



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**TRVANLIVOST LEPENÝCH PŘÍPOJŮ
KONSTRUKČNÍCH DŘEVĚNÝCH PRVKŮ**

DURABILITY OF GLUED JOINTS OF STRUCTURAL TIMBER ELEMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Mičák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tomáš Mlčák
Název	Trvanlivost lepených přípojů konstrukčních dřevěných prvků
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Gerner, M. Tesařské spoje, Grada 2003, 220 s., ISBN 978-80-247-0076-2

Kohout, J. Tesařství: Tradice z pohledu dneška, Grada 1996, 256 stran, ISBN 80-7169-413-4

Koželouh, B. Navrhování tesařských spojů dřevěných konstrukcí (část I.), TZB Info, 2016

Boddenberg, Ralf W: Holzbau Skript II, Hochschule Wismar, Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Kuklík, P., Dřevěné konstrukce, ČKAIT 2005, 172 s., ISBN 80-86769720

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V průběhu provádění sanačních prací v případě historických dřevěných objektů je nutné dodržet tradiční tesařské spoje. U objektů bez statutu památky lze provádět i kombinaci řešení spojů, tj. tradičních tesařských spojů posílených o ocelové spoje či lepené spoje. V případě expozice některých prvků vyšší vlhkostní zátěži pak volba lepidla musí garantovat zvýšené požadavky na pevnost spoje. Autor práce v teoretické části se zaměří na popis struktury dřeva a popis vad, které ovlivňují pevnostní či fyzikální parametry dřeva. V další části obsírně popíše jednak typy tradičních tesařských spojů dřeva a dále typy lepidel zejména s ohledem na jejich odolnost proti objemovým změnám při lepení dřevěných prvků. V rámci experimentální práce pak autor provede:

1. komparaci základních vlastností konstrukčních lepidel (aminových, fenolických či isokyanátových) s parametry tmelů (na bázi MS polymerů či jiných bází), vybrané parametry se ověří experimentálně;
2. navrhne metodický postup na ověření trvanlivosti vybraných typů lepidel a tmelů a dále ověří jejich trvanlivost při využití pro lepený konstrukční spoj a jako výplň sesychacích trhlin dřeva (objemová stálost).

Předpokládaný rozsah práce činí 40 – 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem trvanlivosti lepených přípojů konstrukčních dřevěných prvků. Teoretická část práce se zabývá stavbou dřeva, vybranými vadami dřeva, popisem tesařských spojů a spojovacích prostředků. V práci je také věnována pozornost lepidlům a tmelům používaných v lepených spojih dřevěných konstrukcí či problematice sanačních systémů trhlin ve dřevě. Praktická část práce je zaměřena na experimentální ověření trvanlivosti použitých lepidel a tmelů u vlepovaného tesařského prvku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tesařské spoje, spojovací prostředky, lepený spoj, lepidla, tmely, trvanlivost, sanace

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the topics of durability of glued connections of structural wooden elements. The theoretical part of the work deals with the construction of wood, selected defects of wood, a description of carpentry joints and fasteners. The work also pays attention to adhesives and sealants used in glued joints of wooden structures or the issue of crack repair systems in wood. The practical part of the work is focused on experimental verification of the durability of used adhesives and sealants for glued carpentry elements.

KEYWORDS

Carpentry joints, fasteners, glued joint, adhesives, sealants, durability, remediation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Tomáš Mlčák *Trvanlivost lepených přípojů konstrukčních dřevěných prvků*. Brno, 2019. 57 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Trvanlivost lepených přípojů konstrukčních dřevěných prvků* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 12. 2019

Tomáš Mlčák

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení, přínosné rady a čas, který mi během psaní bakalářské práce věnoval. Dále bych také rád poděkoval panu Ing. Adamu Běťákovvi za výpomoc v laboratoři.

Velké poděkování patří mé rodině za možnost studovat a také za podporu, které se mi dostalo i od přítelkyně a kamarádů.

OBSAH

1.	Úvod.....	11
2.	Stavba dřeva	12
2.1.	Letokruhy.....	12
2.1.1.	Charakteristika letokruhu	12
2.1.2.	Tvar a šířka letokruhu.....	13
2.2.	Běl, jádro, vyzrálé dřevo.....	13
2.2.1.	Běl.....	13
2.2.2.	Jádro	13
2.2.3.	Vyzrálé dřevo	13
2.3.	Dřeňové paprsky.....	15
2.4.	Cévy.....	15
2.5.	Suky	16
3.	Vybrané vady dřevěných prvků	16
3.1.	Trhliny	16
3.1.1.	Čelní trhliny.....	17
3.1.2.	Boční trhliny.....	17
3.2.	Vady způsobené houbami.....	18
3.2.1.	Dřevokazné houby	18
3.2.2.	Tlení dřeva.....	18
3.3.	Dřevokazný hmyz.....	19
4.	Tesařské spoje	20
4.1.	Podélné spoje.....	20
4.1.1.	Spoje na sraz.....	20
4.1.2.	Plátové spoje.....	23
4.1.3.	Čepové spoje	24
4.2.	Příčné spoje.....	26

4.2.1.	Lípnutí	26
4.2.2.	Zapuštění	26
4.2.3.	Drákové spoje	27
5.	Mechanické spojovací prostředky	28
5.1.	Spojovací prostředky kolíkového typu	28
5.1.1.	Hřebíky	28
5.1.2.	Tesařská skoba (kramle)	28
5.1.3.	Kolíky	28
5.1.4.	Svorníky	29
5.1.5.	Vruty	29
5.2.	Spojovací prostředky povrchového typu	30
5.2.1.	Dřevěné hmoždíky	30
5.2.2.	Dřevěné svorníky	30
5.2.3.	Styčnickové desky s trny	30
5.2.4.	Ocelové plechy a tvarovky z ocelových plechů	31
6.	Lepené spoje	32
6.1.	Rozdělení lepidel	33
6.2.	Základní požadavky na vlastnosti lepidla	34
7.	Cíl práce	35
8.	Návrh metodiky ověření trvanlivosti spoje	36
8.1.	Způsoby sanace výsušných trhlin s ohledem na typ používaných lepidel a tmelů	36
8.1.1.	Sanace trhlin dřeva pomocí epoxidové pryskyřice	37
8.1.2.	Sanace trhlin pomocí epoxidové pryskyřice	38
8.1.3.	Sanace trhlin za použití polyuretanového lepidla	39
8.1.4.	Sanace trhlin pomocí MS tmelu	40
8.2.	Zkoušení trvanlivosti lepených spojů	40

8.2.1.	Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání.....	40
8.2.2.	Stanovení odolnosti proti delaminaci	40
8.2.3.	Zrychlené stárnutí (varem) pro lepidla na dřevo	41
8.2.4.	Standardní specifikace pro lepidla na lepené dřevěné prvky	41
8.2.5.	Stanovení odolnosti proti vodě	41
8.3.	Metodika zjišťování trvanlivosti lepených spojů	42
8.3.1.	Výběr typu lepidla/tmelu	42
8.3.2.	Optimalizace expozičního prostředí	42
	Experimentální část	43
9.	Metodika zkoušek	43
9.1.	Lepidla a tmely	43
9.1.1.	Tmel na bázi MS polymeru	43
9.1.2.	Polyuretanový tmel.....	43
9.1.3.	Polyuretanové lepidlo	44
9.1.4.	Epoxidové lepidlo.....	44
9.2.	Zkušební lepené spoje	45
9.2.1.	Lepení vzorků	45
9.2.2.	Zrychlená zkouška trvanlivosti.....	46
9.2.3.	Stanovení pevnosti ve smyku	47
10.	Výsledky a vyhodnocení zkoušek	48
10.1.	Stanovení pevnosti ve smyku.....	48
10.1.1.	Referenční zkušební sada	48
10.1.2.	Expozice těles ve vodním uložení	49
10.1.3.	Expozice těles ve vařící vodě	50
10.1.4.	Vyhodnocení trvanlivosti lepidel	51
11.	Závěr.....	54

1. ÚVOD

Dřevo patří mezi nejstarší přírodní materiály. Lidé ho používají již přes tisíc let jako zdroj energie, k výrobě nástrojů a v neposlední řadě jako stavební materiál. S potřebou bydlení postupně vznikaly primitivní spoje dřev, které se postupem času vyvíjely až do podoby dnešních dokonalých tesařských spojů.

Dřevo jako každý jiný materiál má své přednosti i nedostatky. Mezi přednosti se řadí především jeho dobrá opracovatelnost, pevnost, ale zároveň lehkost a dobré tepelně izolační vlastnosti. Na druhou stranu je velmi citlivé na změnu vlhkosti, což se projevuje bobtnáním či sesycháním a na napadení biologickými škůdci. Další velkou nevýhodou je i jeho vysoká hořlavost.

Na spojování dřevěných konstrukcí jsou kladeny stále větší a větší nároky, kdy už není možné uspokojit potřeby klasickými spoji. Dřevěné prvky je možné spojovat pomocí mechanických prostředků, jako jsou hřebíky, vruty, svorníky apod. Hlavní úlohu nyní hraje široké využití zejména syntetických lepidel, kterými lze dosáhnout větších rozměrů dřevěného materiálu.

Pro samotný lepený spoj je nejdůležitější správný výběr lepidla. Kvalitu a pevnost lepeného spoje určuje přilnavost neboli adhezní síla, která je následným měřítkem pro určení zmiňované kvality spoje.

2. STAVBA DŘEVA

Makroskopická struktura je soubor znaků tvořících kresbu (texturu). Tyto znaky jsou pozorovatelné pouhým okem či lupou a patří mezi ně letokruhy, jarní a letní dřevo, jádro, běl, vyzrálé dřevo, dřeňové paprsky, cévy, pryskyřičné kanálky, dřeňové skvrny a suky [1].

2.1. Letokruhy

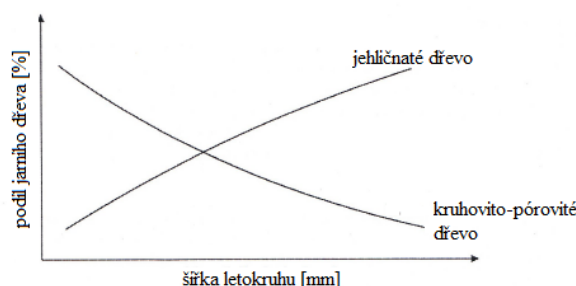
Letokruh je tloušťkový přírůstek dřeva vytvořený během jednoho roku růstu stromu. Vytváří se během vegetačního období periodickou činností kambia (dělivé buňky) [2]. Letokruhy kmene tvoří jakousi soustavu kuželovitých plášťů postupně na sebe navazujících. Takto dochází ke každoročnímu zvětšování průměru stromu. Počet letokruhů udává věk stromu [1]. Na začátku vegetativního období (na jaře) jsou buňky tenkostěnné a velké, dochází k rychlejšímu nárůstu dřevní hmoty. Letní buňky jsou naopak tlustostěnné, malé a tmavší. Růstu stromu se zastavuje s příchodem podzimu [3].

2.1.1. Charakteristika letokruhu

Na příčném řezu kmene tvoří letokruhy převážně koncentrické vrstvy, tj. roční přírůst dřeva, obklopující dřeň. Na radiálním řezu jsou viditelné jako svislé rovnoběžné pásy a na tangenciálním řezu tvoří rozmanitě zvlněné elipsy [1].

Na základě odlišností a výraznosti struktury jarního a letního dřeva je možné dřeviny rozdělit na:

- a) **Jehličnaté dřeviny** mají zónu jarního dřeva světlejší, pórovitější a měkčí, protože je tvořena širokými tenkostěnnými vláknitými buňkami – jarní tracheidy. Letní dřevo je tvořeno pletivem s tlustými stěnami a malým lumenem. Je tmavší, hustější a také tvrdší [4]. Podíl jarního dřeva je většinou vyšší, je také měkčí než dřevo letní [2].
- b) **Dřevo listnáčů s kruhovitě pórovitou stavbou** je strukturou výrazně odlišné na příčném řezu jarního dřeva jsou viditelné okrouhlé otvory (široké cévy – póry), na podélném pak jako rýhy [4]. Převládá zde větší podíl letního dřeva nad dřevem jarním [1].
- c) **Dřevo listnáčů s roztroušeně pórovitou stavbou** je bez výrazného rozdílu jarního a letního dřeva [1]. Póry jsou pouhým okem neviditelné, hranice letokruhu je zvýrazněna jen tmavší a hustější zónou vláknitých pletiv [4].



Obrázek 1 – Závislost podílu jarního dřeva na šířce letokruhu [4]

2.1.2. Tvar a šířka letokruhu

Šířka letokruhu se snižuje v důsledku stárnutí dřeva. Letokruhy nemusí být po obvodu kmene stejně široké, při narušení vývinu stromu dochází k excentricitě kmene [2]. Šířka letokruhů je jedním z ukazatelů fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, je však zřetelná pouze u dřevin, kde je výrazně ohraničené a měřitelné jarní a letní dřevo. Obecně platí, že čím více letního dřeva, tím lepší jsou fyzikální a mechanické vlastnosti [1]. Šířka letokruhů je závislá na podmínkách růstu, na druhu dřeviny a na jejím stáří [5].

2.2. Běl, jádro, vyztřelé dřevo

2.2.1. Běl

Běl je charakterizována přítomností živých buněk v dřeňových paprscích a dřevním parenchymu a průchodností vodivých elementů. Běl zajišťuje transport vody s rozpuštěnými minerálními látkami od kořenů k listům a uskladňování zásobních látek [1]. Jedná se o světlé, nevyspělé dřevo umístěné zpravidla na vnějších kruzích [5]. Běl se rychleji vysouší a více sesychá než jádro, má vysokou pevnost v tahu [3].

2.2.2. Jádro

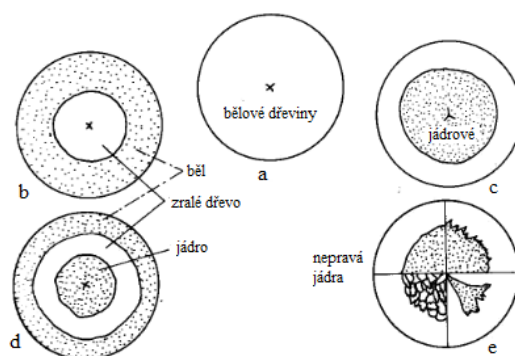
Jádro je charakterizováno nepřítomností živých parenchymatických buněk a neprůchodností vodivých elementů, kterou způsobují thyly. Jádro tak lze považovat za mrtvou tkáň [1]. Jedná se o vyspělé dřevo s nejmenším obsahem vody a vysokou pevností v tlaku. Dochází u něj k menšímu sesychání než u běle [3].

2.2.3. Vyztřelé dřevo

Na čerstvě vytěžené kulatině některých dřevin je po obvodu příčného řezu viditelný pás tmavšího dřeva – běle, která je tmavší kvůli podstatně většímu obsahu vody než ve středové části kmene. Po vyschnutí se tento barevný rozdíl vytratí [1].

Podle charakteru a umístění barevných zón na příčném řezu dřevem kmene se dřeviny rozdělují do následujících skupin:

- a) **Dřeviny bělové** charakterizují parenchymatické buňky rozložené po celém průřezu kmene mající jednobarevné zbarvení v čerstvém i suchém stavu [4]. Mají nejmenší rozdíl vlhkostí mezi centrální a obvodovou částí kmene [1].
- b) **Dřeviny bělové s vyvrálým dřevem** mají po obvodu příčného řezu pás tmavšího běle, která obsahuje podstatně větší množství vody než centrální část kmene [2]. Životnost parenchymatických buněk je velmi odlišná, zatímco v běli je vysoká, ve zralém dřevě je většina buněk mrtvá [4].
- c) **Dřeviny jádrové** mají ve střední části kmene výrazně zbarvenou tmavší zónu jádra a po obvodu světlejší vrstvu běli [2]. Jádro se vyznačuje nižší vlhkostí [1]. V neaktivním jádru jsou všechna pletiva odumřelá, cévy jsou ucpané thyly, tím je způsobena snížená propustnost dřeva [4].
- d) **Dřeviny s bělí, jádrem a vyvrálým dřevem** mají na čerstvé kulatině mezi vlhkou bělí a tmavým jádrem rozpoznatelné světlejší mezikruží suššího vyvrálého dřeva [1].
- e) **Dřeviny s bělí a nepravým jádrem** mají v centrální části příčného řezu kmene tmavěji zbarvenou okrouhlou, ale častěji rozmanitě členěnou zónu s výraznou tmavěji zbarvenou čarou [1].



Obrázek 2 – Rozdělení dřevin dle výskytu zón na příčném řezu dřevem kmene: a – dřeviny bělové, b – dřeviny s bělí a vyvrálým dřevem, c – dřeviny jádrové, d – dřeviny s jádrem, bělí a vyvrálým dřevem, e – dřeviny s bělí a nepravým jádrem [1]

2.3. Dřeňové paprsky

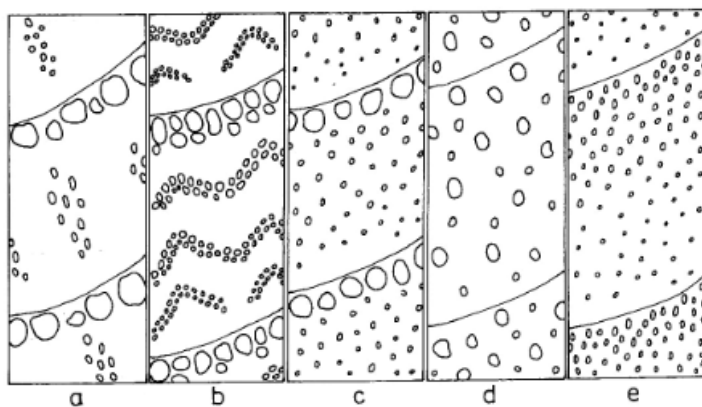
Žilky rozbíhající se paprskovitě od dřeně ke kůře. Jejich funkce je vodivá a zásobní – rozvádí a ukládají živiny na dobu vegetačního klidu [5]. Dřeňové paprsky je možné pozorovat na podélném i příčném řezu, na kterém vytvářejí lesklé pásy [6].

Dle doby vzniku se dělí na primární, které probíhají od dřeně až do lýka a navazují na základní pletivo a sekundární, které nenavazují na dřeň a probíhají od libovolného letokruhu až k lýku [1].

Mají významný vliv na vlastnosti dřeva, z fyzikálních vlastností můžeme zmínit omezené rozměrové změny dřeva v radiálním směru při sušení. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny radiálně orientovanou rovinou paprsku, která je významně slabší [4].

2.4. Cévy

Cévy vytvářejí v listnatých dřevinách soustavu vodivých cest a jsou jedním druhem ze základních pletiv, jejich funkcí je rozvádět živiny (vodu s minerálními látkami) z kořene do koruny stromu [4]. Podle rozměrů rozeznáváme cévy velké, široké tzv. makropóry (větší než 0,1 mm) a cévy malé a úzké tzv. mikropóry (menší než 0,1 mm). Cévy snižují pevnost dřeva [1]. Dle uspořádání cév rozeznáváme listnaté dřeviny kruhovitě pórovité, jejichž cévy jsou soustředěné do jarních přírůstků v letokruzích a tvoří prstence či roztroušeně pórovité mající cévy v letokruhu rovnoměrně rozdělené [6].

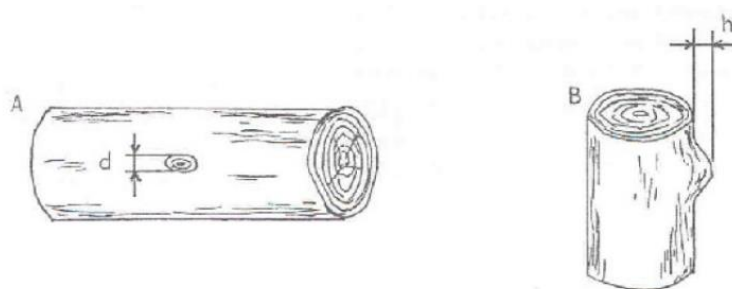


Obrázek 3 – Typy cév: a – dub, b – jilm, c – jasan, d – ořešák, e – buk [2]

2.5. Suky

Suky jsou části živých či odumřelých větví s vlastními letokruhy, které zarůstají dřevem [1]. Podle zdravotního stavu rozeznáváme suky zdravé (bez známek hniloby) a suky nezdravé (poškozené hnilobou) [4]. Tmavší barva suků je způsobena hustějšími letokruhy, u jehličnatých dřevin to může být i pravidelný výskyt reakčního dřeva či přesycení pryskyřicí [2].

Suky porušují celistvost dřeva, snižují pevnost v tahu i ohybu, avšak zvyšují pevnost dřeva v příčném tlaku a smyku podél vláken [3]. I když se jedná o přirozenou vlastnost dřevin, považují se suky za vady dřeva.



Obrázek 4 – Suky na kulatině a způsob jejich měření: A – otevřený suk, B – zarostlý suk, d – nejmenší průměr suku (cm), h – výška vyvýšeniny (cm) [1]

3. VYBRANÉ VADY DŘEVĚNÝCH PRVKŮ

Vady dřeva jsou definované jako nepravidelnosti, či odchylky v kresbě a struktuře dřeva nebo změny tvaru kmene [4]. Vady dřeva mohou být dědičné, získané nesprávnými pěstebními způsoby nebo zásahy během těžby [2]. Níže jsou uvedené vady, které se běžně vyskytují na zabudovaném dřevě a které je nutné v případě jejich zvýšeného výskytu sanovat.

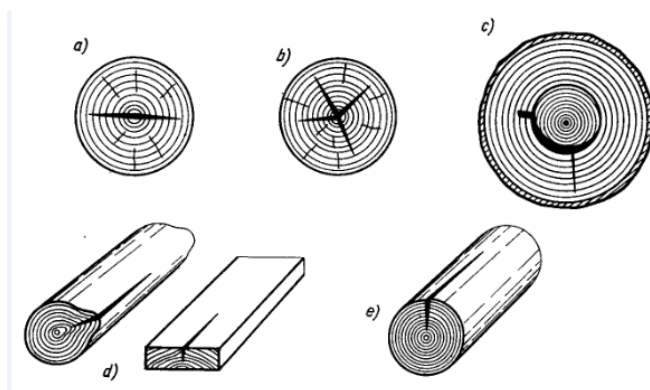
3.1. Trhliny

Trhlinami se rozumí podélné roztrhnutí dřeva v radiálním či tangenciálním směru. Se vznikem trhlin dochází k porušení celistvosti dřeviny, což má za důsledek snížení mechanických vlastností dřeva [4]. Mohou vznikat v době růstu stromu (dřeňové, odlupčivé, mrazové), při těžbě a manipulaci se surovinou (výrobní) a také vlivem sesychání dřeva (výsušné) [3].

3.1.1. Čelní trhliny

Vyskytují se u všech dřevin na čele kulatiny a dělí se následovně:

- a) **Dřeňové trhliny** – směřují radiálně od dřeně, kde jsou nejširší, směrem k obvodu kmene se zužují [3]. Jsou po celé délce kmene, ale nesahají pod kůru [2]. Dělí se dále na jednoduché (jádrové) – jedna nebo dvě trhliny míří v jednom poloměru, a složené (hvězdicovité) – více trhlín navzájem uloženo pod ostřejším úhlem. Vyskytují se převážně u starých stromů s nepravidelně vyvinutou korunou – následek ohýbání stromu větrem [1].
- b) **Odlupčivé trhliny** – na čele kulatiny se projevují buď jako obloukovité trhliny (částečná odlupčivost) mezi letokruhy nebo jako kruhové trhliny (úplná odlupčivost) [1]. Způsobují tak odlupčivost – oddělení dvou sousedních letokruhů [3]. Vznikají vlivem výrazných změn vlastností dřeva – rychlý a skokovitý přechod, např. přechod z úzkých letokruhů na široké [4].



Obrázek 5 – Trhliny: a – jádrová, b – hvězdicovitá, c – odlupčivá, d – mrazová, e – výsušná [3]

3.1.2. Boční trhliny

Vyskytují na bočním povrchu nebo na čele kulatiny a dělí se následovně:

- a) **Mrazové trhliny** – vznikají ve stromě uvolněním napětí obvodu kmene smršťováním vlivem silného mrazu [2]. Jedná se o radiální trhliny po délce kmene zejména u tvrdých listnáčů. Přes vzniklou trhlínu proniká do kmene voda, která zde zamrzá a trhlínu tak více otvírá [4].
- b) **Výsušné trhliny** – vznikají na boku kulatiny a řeziva následkem nerovnoměrného vysychání, postupně se zužují od povrchu do hloubky dřeviny [4]. Probíhají převážně v radiálním směru, protože je zde menší sesychání než ve směru tangenciálním [2]. Čím rychleji bude dřevo sesychat, tím větší trhliny budou [6].

3.2. Vady způsobené houbami

Houby jsou jednobuněčné nebo mnohobuněčné heterotrofní stélkaté rostliny bez chlorofylu, živící se organickými zdroji uhlíku [2]. Houby jsou nižší formou rostlin, není u nich vyvinuta fotosyntéza, a proto nejsou schopné asimilovat anorganické látky.

Tělo hub (stélka) tvoří hyfy, spleť hyf tvoří vlastní vegetativní tělo hub, tzv. podhoubí (mycelium). Houby se rozmnožují nepohlavně i pohlavně. Podle způsobu výživy rozeznáváme houby parazitické, které napadají běl, saprofytické, rozkládající mrtvé dřevo a sapoparazitické, které znehodnocují živé i mrtvé dřevo [1].

3.2.1. Dřevokazné houby

Podle rozkladu stavebních složek se dřevokazné houby rozdělují na celulózovorní a ligninovorní [1]. Dřevo poškozené celulózovorní houbou (dřevomorka domácí) – rozleptává svými enzymy polysacharidickou složku dřeva – se kostkovitě rozpadá, pomalu hnědne, stává se křehkým [7]. Způsobují tzv. destrukční rozklad dřeva [4]. Ligninovorní houby (václavka obecná) rozkládají kromě celulózové složky i lignin. Dřevo napadané touto houbou je světlé, měkké až drobivé a vykazuje díry a dutiny okem viditelné [2]. Způsobují tzv. korozivní rozklad dřeva [4].

Nákaza houbami se na stromech projevuje růstovými změnami (nádory, ztloustnutím spodní části kmene), výrony pryskyřice u jehličnanů či klejotokem u listnáčů. Uvnitř stromu se nákaza projevuje změnou zbarvení s porušením struktury (hniloba) či bez porušení [1]. K vývoji dřevokazných hub dochází pouze za určitých podmínek (určitá vlhkost a teplota). Pokud má být vývoj hub zastaven, musí být podíl vzduchu ve dřevě v rozmezí 5-20 % [15].

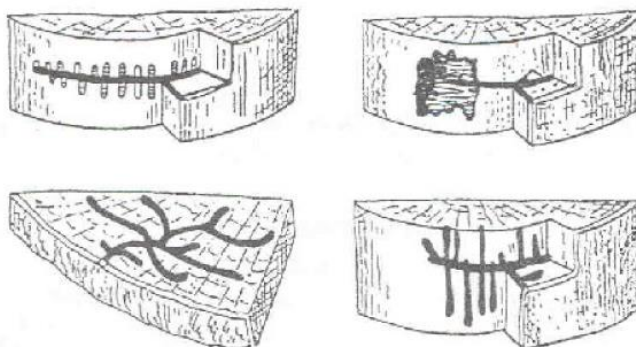
3.2.2. Tlení dřeva

Tlení způsobují svou činností dřevokazné houby, jedná se o vážnou vadu dřeva, která se projevuje změnou barvy dřeva i jeho strukturou [6]. Tlení prochází několika stádii. Ze začátku dřevo pouze mění svou barvu, ale ještě neměkne – tvrdá hniloba, postupně se však zhoršují fyzikální i mechanické vlastnosti. Další fází je měkká hniloba, kdy dochází k výraznému snížení tvrdosti. Podle polohy hniloby v kmeni rozlišujeme hnilobu bělí a jádra [1]. Na příčném řezu se hniloba jeví jako skvrny a na podélném řezu jako pruhy a klíny [3]. Podle umístění ve stromě rozlišujeme kořenovou (začíná v ranách kořenů, odkud se šíří do kmene) a kmenovou hnilobu, která se šíří od odlomených větví nebo ran [1].

3.3. Dřevokazný hmyz

Počet druhů dřevokazného hmyzu je poměrně velký – škůdci na živém stromu, na skládce dřeva, na konstrukčním dřevě či na předmětech vyrobených ze dřeva [7].

Larvy hmyzu, žijící pod kůrou stromu, porušují přítok vyživujících látek do stromu a tím tak ničí dřevo [3]. Dospělý hmyz (imago) naklade vajíčka na povrch kůry, do lýka či chodeb, které do dřeva vyhryžou. Z vajíček se následně vyvinou larvy, které požírají pupeny, listy, kůru i dřevo stromu [2].



Obrázek 6 – Příklady poškození dřeva dřevokazným hmyzem [1]

Stejně jako u dřevokazných hub rozeznáváme parazitický hmyz napadající živé stromy, saprofytický hmyz působící na odumřelém dřevě a saproparazitický hmyz na čerstvě vytěžené kulatině [1]. Podle hloubky poškození dřeva rozlišujeme poškození povrchové, mělké a hluboké [6].

4. TESAŘSKÉ SPOJE

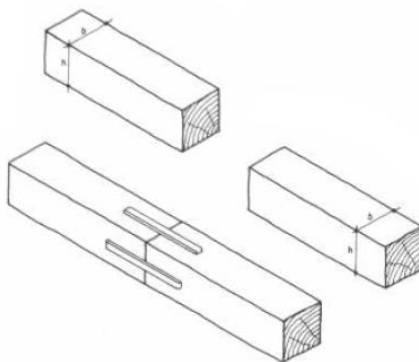
4.1. Podélné spoje

4.1.1. Spoje na sraz

Nejjednodušší tesařské spoje využívané při částečném či plném podepření trámu po celé délce (např. pozednice), vždy však musí být pod spojem podpora [8].

Tupý (čelní) sraz je jednoduché napojení dvou dřev. Spojovaný materiál – kulatina či hranol, dřeva vodorovná či svislá – se seřízne do pravého úhlu a přirazí k sobě. Není schopný přenášet tahové síly ani boční posuv, ve vodorovném uspořádání nezamezí ani zvedání konců dřev či jejich kroucen [9].

Stabilitu spoje zajišťují tesařské skoby, které se přibijí buď shora, ze stran nebo shora i ze stran. Aby skoba v konstrukci nepřekážela a byl zajištěn hladký povrch materiálu, vydlabe se pro ni lůžko a zapustí se tak do dřeva [3]. Skoba musí být zaražena dostatečně daleko od čela srazu, předejde se tak nebezpečí rozštípnutí trámu. Místo skob mohou být použity i příložky [10].

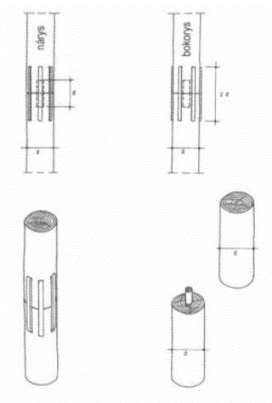


Obrázek 7 – Tupý sraz [9]

Svislé nastavování trámů či kulatiny

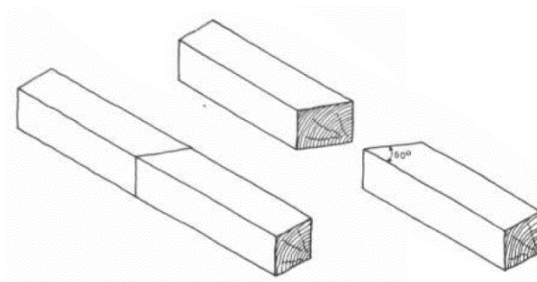
Svislé spoje mohou být o něco jednodušší než vodorovné, protože čela nastavovaných sloupů jsou tlačena [5].

Tupý sraz s kolíkem je vylepšením prostého srazu. Používá se ke spojení svislých sloupů. Jeho stabilita se zajišťuje tesařskými skobami [8]. Svislému nastavování se též říká štěpování, spoj je také možné zpevnit zapuštěnými ocelovými či dřevěnými příložkami [5]. Kolík je vyroben z tvrdého dřeva a je zavrtán na obou koncích čela, jeho průměr činí asi 2,5 cm a délka 13-15 cm [9].



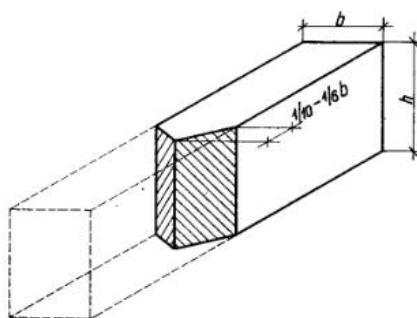
Obrázek 8 – Tupý sraz s kolíkem a skobami [9]

Šikmý (čelní) sraz nedokáže přenášet tlakové síly a dochází tak ke snížení přenosu sil ve směru vláken [9]. Délka zešikmení závisí na šířce podpory, pokud je podpora úzká je zešikmení rovné třetině šířky podpory, při větším rozměru podpory je délka zešikmení rovna polovině rozměru dřeva [3]. Bočnímu posunu brání zajištění tesařskými skobami umístěnými na svrchu spojovaných trámů [8].



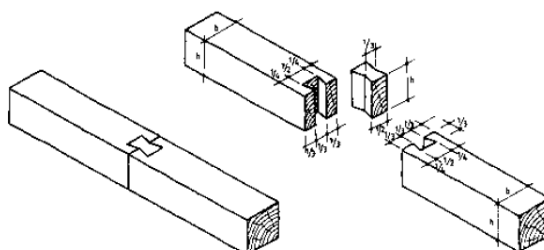
Obrázek 9 – Šikmý sraz [9]

Klínovělný sraz má čelo jednoho trámu upravené v klín, jehož délka by se měla pohybovat mezi $1/6$ a $1/8$ výšky hranolu. Čelo druhého spojovaného hranolu upravíme v drážku s rozměry klínu [8]. Klínovitost čel zamezuje vodorovnému vybočení hranolů ze spoje. Pevnost spoje se dá podpořit příložkami či skobami [3].



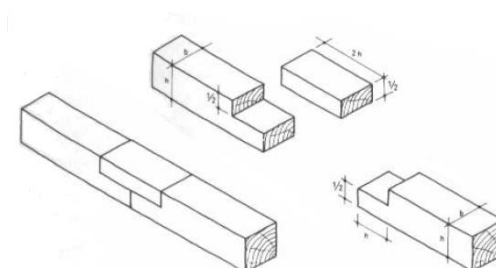
Obrázek 10 – Sraz klínovitý [3]

Sraz s rybinovou vložkou vyžaduje velkou přesnost lícování, přes rybinu však dokáže zachytit boční smykovou sílu i menší síly tahové. Délka rybinové vložky má být zhruba dvě třetiny výšky spojovaných dřev. Existuje i spoj s poloviční výškou rybiny. Spoj není nutné stabilizovat dalšími spojovacími prostředky [9].



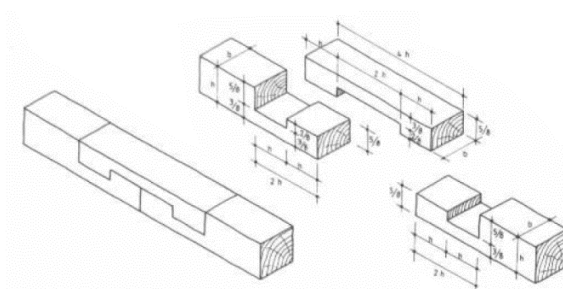
Obrázek 11 – Sraz s rybinovou vložkou [9]

Rovně vyříznutý sraz s vloženým středním kusem je poměrně labilním spojem, proto se vždy pojišťuje svorníky. Středová příložka je pak schopna zachytit tahové síly, boční posuv či síly smykové. Oba spojované hranoly se na horní straně opatří vybráním, jehož délka je rovna minimálně dvojnásobku výšky dřeva a hloubka polovině výšky hranolu [9].



Obrázek 12 – Rovně vyříznutý sraz s vloženým středním kusem [9]

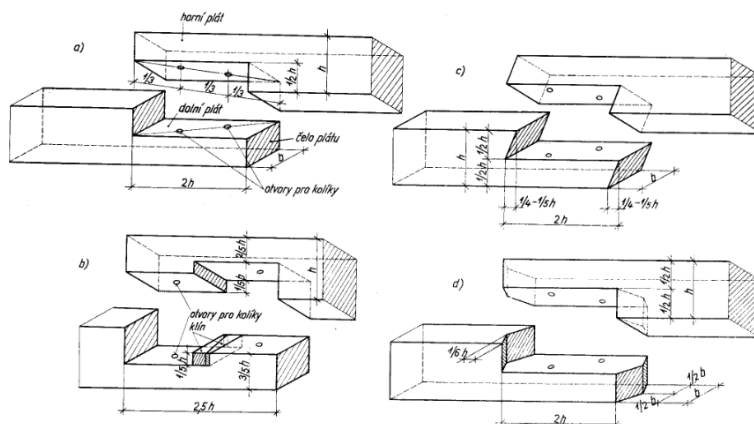
Rovně vyříznutý sraz s vloženým hákem umožňuje dosáhnout vyšší odolnosti ve vzpěru. Tahové síly nepřenáší jen svorníky, ale i čela ozubu. Výška háku je v nejnižší části rovna třem osminám výšky spojovaných hranolů, na koncích je pak o dvě osminy vyšší. Délka háku činí zhruba čtyřnásobek výšky dřeva [9].



Obrázek 13 – Rovně vyříznutý sraz s vloženým hákem [9]

4.1.2. Plátové spoje

Používají se tam, kde je spoj dvou hranolů podepřen minimálně nebo vůbec [8].

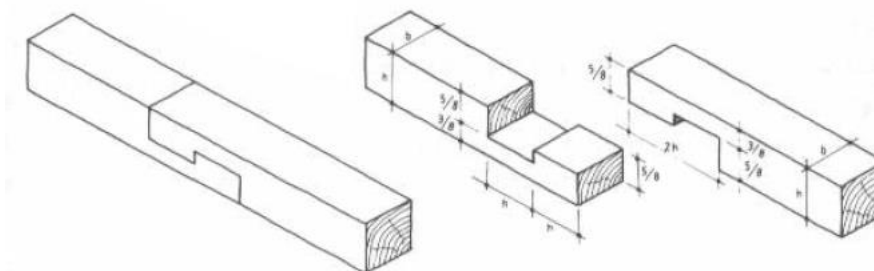


Obrázek 14 – Rovné plátování: a – rovnočelné, b – rovnočelné s ozubem a klíny, c – šikmočelné, d – klínočelné [3]

Rovný plát je jednoduchý podélný spoj, je však nestabilní, protože není jištěn proti zdvihu horního dílu plátu, nezachycuje boční posuv, ani tahové síly či vzájemné pootočení dřev. Pláty tak musí být dodatečně zajištěny dřevěnými hřeby, hřebíky, skobou nebo styčníkovými plechy [9]. Výška plátu by měla odpovídat polovině výšky dřeva, délka pak minimálně dvojnásobek výšky plátu [8].

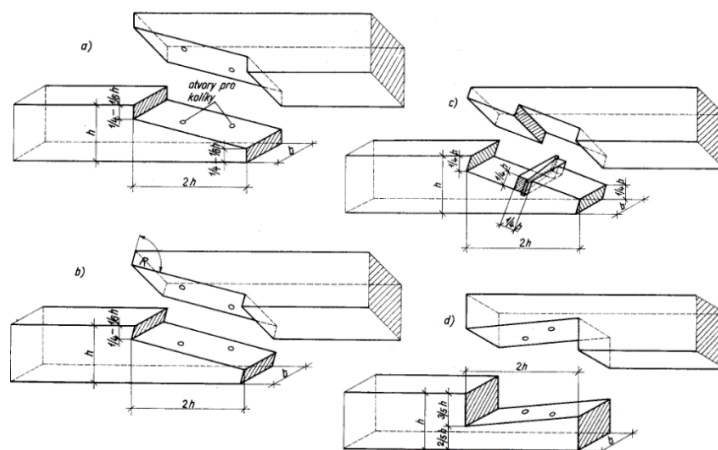
Rovné plátování rovnočelné s ozubem a klíny je spoj odolný tahu v podélném směru, toho se dosáhne zhotovením ozubů na plátech, které stáhneme svorníky. Klíny v tomto spoji slouží k zabránění vzájemnému zamáčknutí čel ozubů při větším tahovém namáhání [3].

Rovný hákový plát je schopen přenést tlakové i tahové síly v podélném směru, jeho polohu jistí skoby nebo dřevěné hřeby, kterými se zároveň zajistí boční posuv. Zdvih eliminují svorníky. Délka plátu je rovna dvojnásobku až trojnásobku spojovaných dřev. Výška ozubů činí čtvrtinu výšky dřeva [9].



Obrázek 15 – Rovný hákový plát [9]

Příklady šikmého plátování:



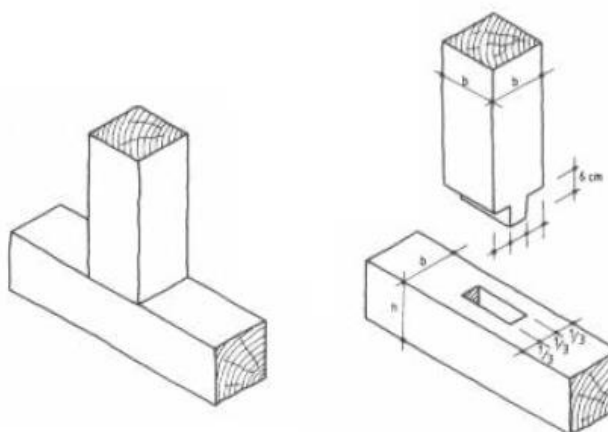
Obrázek 16 – Šikmé plátování: a – rovnočelné klesající, b – šikmočelné klesající, c – šikmočelné klesající s ozubem a klíny, d – rovnočelné stoupající [3]

4.1.3. Čepové spoje

Hlavním prvkem v tomto spoji je tzv. čep – výstupek vytvořený na čele jednoho trámu, zatímco druhý trám je opatřen prohlubní pro tento čep – dlabem [8].

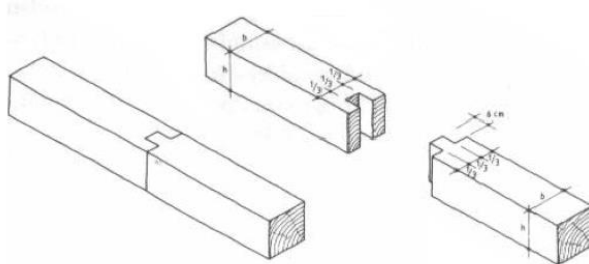
Rovný (střední) čep se využívá při spojování hranolů, jejichž podélné osy spolu svírají pravý úhel. Stabilitu spoje zajistí kolíky nebo hřebíky [3].

Využívá se v situacích, kdy se spojují trámy o přibližně stejné tloušťce, anebo při značném rozdílu tlouštěk spojovaných dřev. V rohových spoích se používají jednostranně, dvoustranně odsazený čep [8].



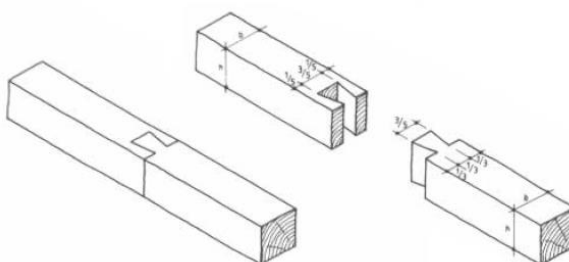
Obrázek 17 – Rovný čep [9]

Čepový sraz (drážkový čep) slouží ke spojování pravoúhlých vaznic. Brání bočnímu posuvu i otočení vázaných dřev vůči sobě, většinou se jistí skobou do dřeva nebo styčníkovými plechy. U starších konstrukcí je spoj jištěn hřebíky a je tak zajištěn proti vychýlení směrem nahoru i dolů. Čep je dlouhý minimálně 5 cm a dlouhý maximálně na šířku dřev, jeho šířka je rovna třetině šířky dřeva [9].



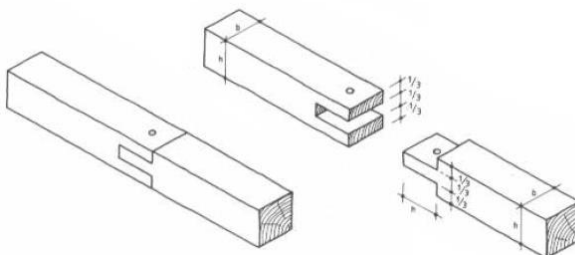
Obrázek 18 – Čepový sraz [9]

Rybinový čep je ještě účinnější díky rybině, která dokáže podchytit i menší tahové síly. Rybina musí být provedena ze dřev majících podobně orientovaný směr vláken, její délka je rovna dvěma třetinám výšky hranolu, na užším konci měří třetinu a na širším konci tři pětiny výšky hranolu [9].



Obrázek 19 – Rybinový čep [9]

Ostříhový čep je při napojování dřev orientovaný naležato, není povolena žádná vůle. Pokud je zajištěn dřevěným hřebem, pak může přenést i menší tahové síly. Je dlouhý přibližně jako šířka nebo výška dřeva, jeho tloušťka je obvykle rovna třetině výšky dřeva [9].

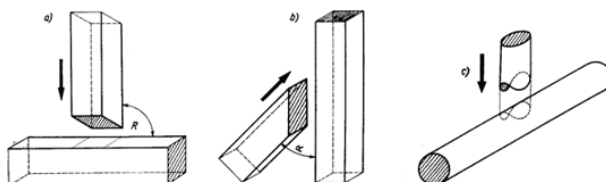


Obrázek 20 – Ostříhový čep [9]

4.2. Příčné spoje

4.2.1. Lípnutí

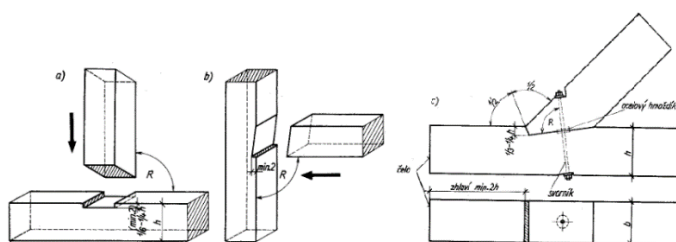
Nejjednodušší spoj dvou vzájemně kolmých nebo šikmých dřev. Při tomto spojování je jedno dřevo prostě přiloženo k podélné ose dřeva druhého [11]. Pomocí přílozek či skob zajistíme stabilitu spoje proti vybočení [3].



Obrázek 21 – Lípnutí: a – kolmé rovnočelné, b – šikmé šikmočelné, c – zaoblené [3]

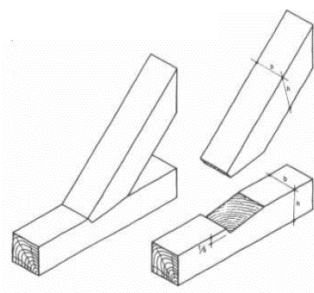
4.2.2. Zapuštění

Spojení vzájemně kolmých nebo šikmých dřev, přičemž čelo jednoho dřeva je zapuštěno celou dosedací plochou do výřezu ve druhém dřevě. Pomocí přílozek či skob zajistíme stabilitu spoje proti vybočení [11].



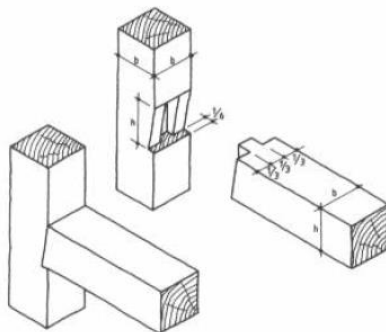
Obrázek 22 – Zapuštění: a – kolmé rovnočelné, b – kolmé šikmočelné, c – šikmé jednoduché, zajištěné svorníkem a hmoždíkem [3]

Čelní zarážka je nejpoužívanější zarážkou. Hloubka čela zapuštění se pohybuje v rozmezí jedné pětiny až šestiny výšky hranolu, který zarážka zachycuje. Je však lepší výšku vypočítat, protože velikost čelní plochy má největší vliv na velikost tlakových sil, které je možné spojem přenášet. Spoj by měl být zajištěn svorníkem či skobami [9].



Obrázek 23 – Čelní zarážka [9]

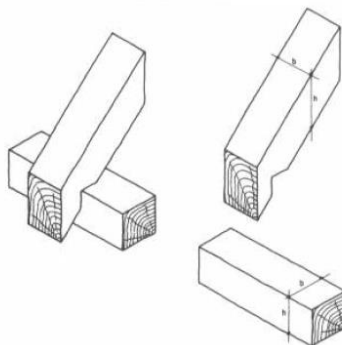
Jednoduché šikmé zapuštění (zapuštěný čep) je nejhojněji používaný spoj u okenních otvorů, dveří či překladů, které prostřednictvím spoje přenášejí zatížení na sloupy [9].



Obrázek 24 – Čep okenního paždíku [9]

4.2.3. Drápové spoje

Zadrápnutí přes zásek na krokvi slouží ke spojení s hřebenovou, středovou či prahovou vaznicí. Zásek musí mít dostatečně široké uložení a nesmí zasahovat příliš hluboko, aby nedošlo k oslabení krokve. Protože se jedná o poměrně volně sedící spoj, musí úhel sklonu a pravoúhlost přesně souhlasit [9].



Obrázek 25 – Zadrápnutí přes zásek na krokvi [9]

5. MECHANICKÉ SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY

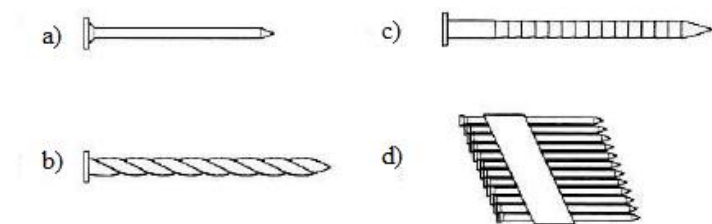
Účelem je zajištění správné polohy spojovaných dřev. Podle přenosu sil ve spoji rozeznáváme spojovací prostředky kolíkového typu (hřebíky, sponky, svorníky, kolíky a vruty) a spojovací prostředky povrchového typu (hmoždíky, desky s prolisovanými trny a ocelové plechy a tvarovky).

5.1. Spojovací prostředky kolíkového typu

5.1.1. Hřebíky

Klasické stavební hřebíky mají hladký dřík kruhovitého průřezu, existují však i hřebíky čtvercového průřezu. Pro zlepšení únosnosti se upravuje povrch: závitem, drážkami nebo zkroucením hřebíků čtvercového průřezu. Vyráběny jsou buď bez povrchové úpravy, nebo s ochranou proti korozi, např. galvanizací [11].

Hřebíky mohou být zaráženy ručně nebo přenosnými pneumatickými hřebíkovačkami. K předejetí rizika rozštípnutí je nejlepší metodou předvrtání dřeva [7].



Obrázek 26 – Typy hřebíků, a) kruhový drátěný, b) šroubový, c) drážkovaný, d) zásobník pro strojní zarážení [12]

5.1.2. Tesařská skoba (kramle)

Obdoba hřebíku, mají však dva dříky menšího průměru a do dřeva se zarážejí mechanickými či pneumatickými sponkovačkami [7]. Kované z ploché či kruhové oceli, dostatečně ostré, aby šly lehce zarazit do dřeva. Používají se při nastavování tlustších dřev, či spojení hranolů ležících vedle sebe. Kramle po zarážení slouží k přenosu tahu, nikoli tlaku do dřeva [3].

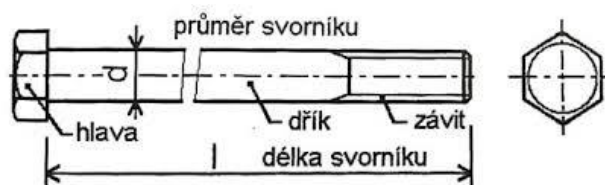
5.1.3. Kolíky

Štíhlé ocelové válcové tyče většinou s hladkým povrchem. Tyto spoje jsou velmi schopné pro přenos velkých sil. Kolíky jsou namáhané příčnou silou [7]. Kolíkový spoj musí obsahovat minimálně čtyři kolíky. Předvrtané otvory do dřeva musí být stejného průměru jako průměr kolíku [11].

5.1.4. Svorníky

Ocelové kolíkové spojovací prostředky opatřené na jednom konci čtyřhrannou či šestihrannou hlavou, na druhém konci závitem pro matici, pod kterou se stejně jako pod hlavu vkládá podložka (kruhová, čtvercová). Svorníkové spoje jsou vhodné zejména pro velké přípoje, či větší tloušťky materiálu [3].

Rozeznáváme dva druhy svorníků – spínací, které zajišťují spoje dřev s tesařskými vazbami, nebo nosné, využívané k bodovému spojení dřev bez použití tesařských vazeb [8]. Otvor se předvrtává větší o 1 mm, svorníky se utahují do těsného kontaktu. Po dosažení rovnovážné vlhkosti ve dřevě je třeba svorníky dotáhnout [7].

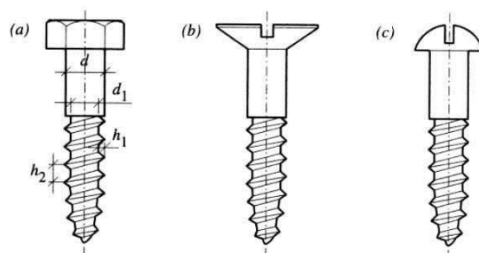


Obrázek 27 – Svorník [11]

5.1.5. Vrutý

Vrutý jsou zpravidla využívány při jednostřížných spojích, například při připojení ocelové příložky, třmene nebo kotvy ke dřevu [7]. Své využití však najdou i tam, kde je žádoucí velmi dobrého spoje jednoho dřeva ke druhému či tam, kde je spojení mechanicky namáháno [3].

K zabránění možného rozštípnutí dřeva by neměly být vrutý zaráženy, ale zašroubovány do předvrtaných otvorů [11].



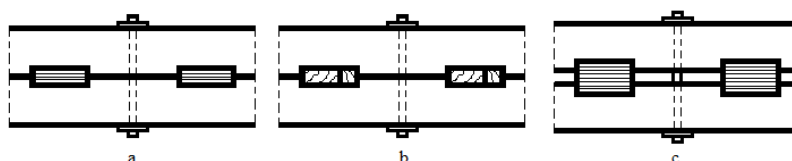
Obrázek 28 – Typické vrutý do dřeva, a – vrut se šestihrannou hlavou, b – zápustný vrut, c – vrut s půlkulovou hlavou [12]

5.2. Spojovací prostředky povrchového typu

5.2.1. Dřevěné hmoždíky

Spojovací prostředky, které se vkládají do spár mezi spojovanými dřevěnými prvky a slouží k přenosu smykové síly mezi hranoly, anebo zabraňují vzájemnému posunu ve spoji [8].

Průřez mají ve tvaru hranolů nebo rybiny s vlákny rovnoběžnými nebo kolmými vůči spojovaným prvkům [10]. Hmoždíky se vyrábějí z tvrdého dřeva a vždy se doplňují stahovacími svorníky, které se dodatečně dotáhnout při seschnutí hmoždíků [11].



Obrázek 29 – Dřevěné hmoždíky: a – podélné, b – příčné (klíny), c – s mezerou [11]

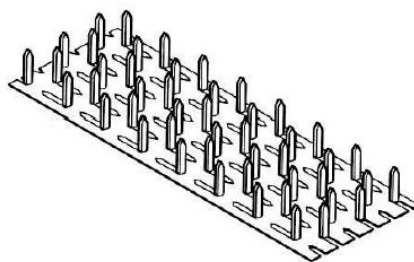
5.2.2. Dřevěné svorníky

Průběžné kolíky ze tvrdého dlouhovlákného dřeva, rozklínované na obou koncích, které mohou nahradit železný svorník s polovičním průměrem. Při roztahování spojovaných materiálů se rozklínované hlavy svorníků vtlačují do měkkého dřeva a tím se spoj otevře, proto došlo k vynálezu rybinových svorníků ve tvaru „K“ nebo „V“ [9].

5.2.3. Styčnickové desky s trny

Desky jsou vyráběny z plechu nerezové oceli či plechu se zinkovou povrchovou úpravou s jednostranně prolisovanými trny odkloněnými od roviny v pravém úhlu [8]. Desky musí být vtlačovány do dřeva lisovacím zařízením, nesmí být zatloukány. Používají se na spojení dvou, tří nebo čtyř dřev stejné tloušťky [11].

Spojování dřevěného materiálu deskami s trny je nejefektivnější náhradou klasických tesařských vazeb a příhradových konstrukcí [9].

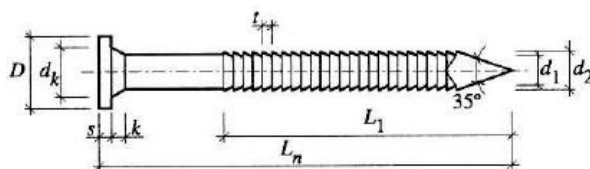


Obrázek 30 – Styčnicková deska s trny z prolisovaného plechu [12]

5.2.4. Ocelové plechy a tvarovky z ocelových plechů

Zinkované, děrami odlehčené plechy umožňují spojení dřev obdélníkového průřezu (patky nosníků, trámové spojky) [9].

Připojovacími prostředky jsou zde konvexní hřebíky, které mají stromkovitě upravený povrch a pod hlavou kuželovou úpravu, aby zcela vyplnily otvory ve tvarovém plechu, dřevo se pro ně nemusí předvrtávat [11].



Obrázek 31 – Konvexní hřebík [12]

6. LEPENÉ SPOJE

Použití dřeva jako stavebního materiálu je z hlediska přirozených rozměrů omezeno na relativně malé délky, či průřezy. Jednou z možností, jak zajistit větší rozměrové proporce je spojení dvou či více dřevěných materiálů lepidlem. Lepené spoje tvoří jednotný celek a jsou tvořené bez mechanických spojovacích prostředků [13].

Lepidlo je nekovový materiál organického původu, nebo látka vyráběna synteticky, která má vysokou vnitřní soudržnost a přilnavost k povrchu tuhých látek [5]. Po určitém čase lepidlo tvrdne a musí vykazovat dostatečnou pevnost a trvanlivost i bez působící tlakové síly, tento proces označujeme jako proces vytvrzování a tuhnutí. Během tohoto procesu dochází v lepidle k chemickým a fyzikálním procesům, které jsou však nežádoucí, protože při působení zatížení u nich dochází k velkým přetvořením [13].

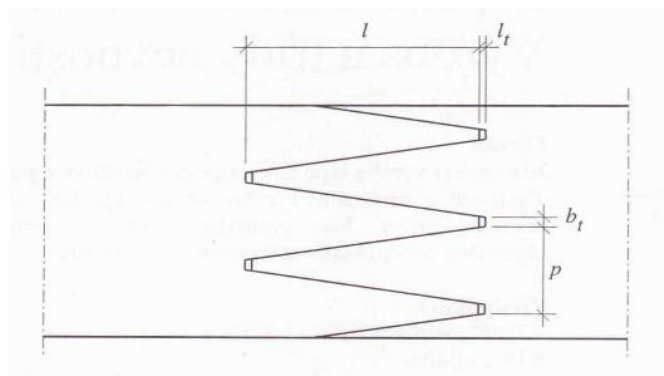
Při lepení dřeva je důležité dodržet určité zásady, plochy musí být očištěné a odmaštěné. Nerovnost povrchu by neměla být větší než 0,2 mm. Směr vláken ve spáře má též velký vliv na pevnost spoje [6].

Výhody lepených spojů [6]:

- Možnost slepit dva či více kusů bez omezení jejich tloušťkou.
- Možnost vytvořit vodotěsné i plynotěsné spoje.
- Neporušená celistvost ani estetický vzhled materiálu.
- Nevýrazný příbytek hmotnosti lepené soustavy.

Nevýhody lepených spojů [6]:

- Nutnost dobře čistého a rovného povrchu.
- Nerozebíratelný spoj.
- Možnost lepit jen za určité vlhkosti a teploty dřeva.



Obrázek 32 – Spoj zubovitý: l – délka zubu, p – rozteč zubů, b_t – šířka tupého zakončení zubů, l_t – vůle v zubovitém spoji [7]

6.1. Rozdělení lepidel

Základní dělení lepidel pro konstrukční dřevo dle EN 301:2017:

- **Lepidla typu I** – pro použití ve vnitřním i vnějším prostředí (třída 1, 2, 3).
- **Lepidla typu II** – pro použití pouze ve vnitřním prostředí (třída 1).

Dělení lepidel podle složení:

- **Jednosložková** – smíchání lepidla s ředidlem, k vytvrzení dochází na vzduchu po odpaření ředidla
- **Dvousložková** – působí po smíchání lepidla s tvrdidlem

Mezi lepidla, která jsou používána pro lepené dřevěné **nosné** prvky, patří:

- a) **Fenolická a aminová lepidla** dle EN 301:2018:
 - **Resorcinol formaldehydové (RF) a fenol-resorcinol formaldehydové (PRF)** – typ I, tmavé barvy, odolné, pevné, stálé, vhodné na namáhané lepené nosníky, nedelaminují při požáru.
 - **Fenol-formaldehydové (PF)** – za tepla vytvrzované, použití na LVL desky, překližky a DTD.
 - **Fenol-formaldehydové (PF)** – za studena vytvrzované, použití na nenosné prvky, neodolné vůči kyselinám.
 - **Močovino-formaldehydové (UF)** – typ II, za tepla vytvrzované, pouze na nenosné překližky a desky, málo odolné vůči vyšší teplotě a vlhkosti, použití do interiéru.
 - **Melamin-močovino formaldehydové (MUF)** – typ I, za studena vytvrzované, levné, světlý odstín.
- b) **Kaseinové lepidlo** – nejstarší typ lepidel, spadá mezi lepidla typ II, dle ČSN EN 12 436:2002
- c) **Polyuretanové lepidlo** – typ I, jednosložkové nebo dvousložkové, pevné, málo odolné vůči povětrnosti, použití pro speciální účely, norma EN 15 425:2017
- d) **Emulsní polyizokyanáty (EPI)** – typ I, polymery na bázi vody nebo směsi polymerů síťované izokyanáty EN 16 254+A1:2016
- e) **Epoxidové lepidlo** – typ I, pevné, trvanlivé, drahé, použití ve speciálních případech na opravy delaminovaných nosníků či na lepení FRP materiálů.

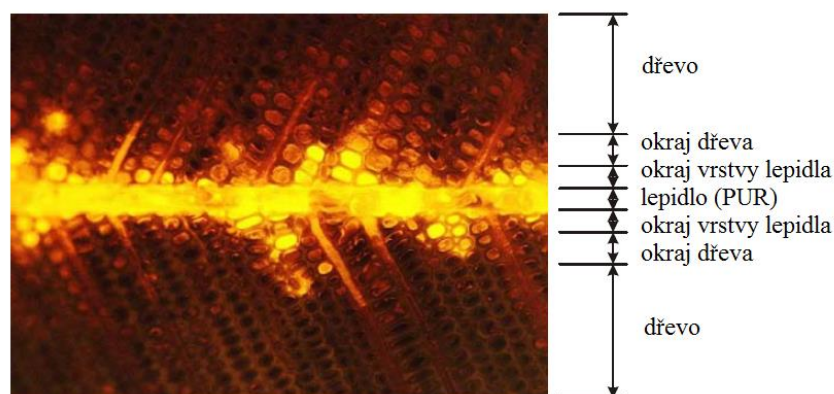
Mezi lepidla, která jsou používána pro lepené dřevěné **nenosné** prvky, patří dle EN 204:2017:

- a) **PVAc** – disperze malých kapiček polyvinylacetátu ve vodě, většinou třída odolnosti D3 – odolnost proti vlhkosti;
- b) **pMDI** – polymer methyldifenyldiisokyanát, vodovzdorné tvrdidlo.

6.2. Základní požadavky na vlastnosti lepidla

Lepidla pro lepené konstrukce musí vyhovovat požadavkům normy ČSN EN 302:2013, část 1 až 8. Nejdůležitějším požadavkem je, aby byla pevnost spoje větší, než je pevnost samostatné spojované části. Důležitá je též dostatečná pružnost a odolnost proti povětrnostním vlivům, plísním a houbám [10].

Únosnost spoje je definována adhezí a kohezí lepidla a dřeva. Adhezní síla – přilnavost lepidla se dřevem a kohezní síla – soudržnost lepidla v lepené spáře jsou větší než soudržnost dřeva. To znamená, že při případné mechanické destrukci dojde k porušení dřevěného materiálu, nikoliv lepeného spoje [14]. Při nanášení na spoj musí být lepidlo dostatečně tekuté, aby zateklo do mezery a lepená plocha byla pokrytá souvislou vrstvou lepidla, toho docílíme pomocí přiměřené tlakové síly působící na spojovaný materiál. Během procesu lepení proniká lepidlo až do dřevních buněk nacházejících se na okrajích lepených ploch. V místě spoje vzniká tzv. zazubení [13].



Obrázek 33 – Detail lepené spáry – zazubení [13]

Všechna běžně používaná lepidla splňují požadavek na pevnost, kdy lepidla musí mít větší pevnost než pevnost lepeného dřeva ve smyku podél vláken a pevnost v tahu kolmo k vláknům, zároveň ale ani jedno z nich nemá větší pevnost než dřevo v tahu podél vláken [11].

7. CÍL PRÁCE

Bakalářská práce se zabývá problematikou sanací dřevěných prvků. V rámci teoretické části jsou v práci popsány hlavní způsoby poškození dřeva, se kterými se lze v praxi setkat. A dále způsoby tesařských spojů dřeva a spojů dřeva za použití kovových spojovacích prostředků, které jsou v praxi v průběhu sanací prováděny. Nedílnou součástí je výčet lepidel používaných k lepení dřevěného materiálu.

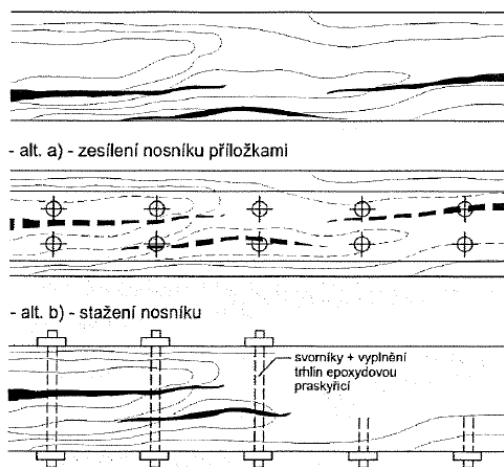
Motivací práce je skutečnost, že v průběhu sanací dřeva je k dispozici na trhu větší množství druhů lepidel, nicméně u některých z těchto typů lepidel či tmelů není zřejmá jejich trvanlivost či aplikační vhodnost na různé typy sanačních prací. Proto hlavním cílem této bakalářské práce je **experimentální ověření lepených spojů dřeva různými typy lepidel a tmelů** na rozdílné bázi a porovnání jejich odolnosti zejména **vůči vlhkostnímu namáhání**. Na základě komparace zjištěných vlastností konstrukčních lepidel (fenolických či isokyanátových) a vlastností parametrů tmelů (na bázi MS polymerů či jiných bází) lze poté vyhodnotit jejich vhodnost pro různé aplikace. V rámci experimentální práce je cílem rovněž navrhnout metodický postup na ověření trvanlivosti vybraných typů lepidel.

8. NÁVRH METODIKY OVĚŘENÍ TRVANLIVOSTI SPOJE

8.1. Způsoby sanace výsušných trhlin s ohledem na typ používaných lepidel a tmelů

Ochrana dřeva a dřevěných konstrukcí je běžně složena z několika procesů, mezi které patří **chemická ochrana** (prováděna vakuotlakovou, tlakovou nebo vakuovou impregnací, máčením, postřikem, ponořováním či injektážními ochrannými chemickými prostředky), **fyzikální ochrana** (v praxi pomocí sterilizace dřeva proudem horkého vzduchu či za použití mikrovlnného ohřevu), či **mechanická ochrana** (bandážování, oplášťování, protézování atp.) [15].

S ohledem na zadání práce jsou následně popsány pouze technologie, které se zabývají sanací trhlin ve dřevěných prvcích. Trhliny v dřevěných prvcích jsou buď přiznané, nebo v případě většího rozsahu či u trhlin s dopadem na statiku prvku je nutné tyto trhliny sanovat. Sanace spočívá zejména v aplikaci lepidel. Na větší praskliny, či tvarování hran je nejvhodnější použít tvrdé **dvousložkové tmely** – **polyuretanové, epoxidové či polyesterové**. Mezi jejich největší výhody patří rychlost vytvrzení, je však nutné s nimi pracovat rychle. Po vytvrzení je možné přebytek tmele zbrousit. Oproti tmelům akrylátovým u nich nedochází k propadnutí. Další možností je použití akrylátových tmelů, u kterých však hrozí propadnutí, většinou se tak nanáší ve více vrstvách, které se pak zbrousí do roviny s výchozím materiálem.



Obrázek 34 – Varianty sanace trhlin vzniklých od smršťování ve stropnici [15]

8.1.1. Sanace trhlin dřeva pomocí epoxidové pryskyřice

Specifikace systému XEPOX

Vysoce účinné dvousložkové epoxidové lepidlo vhodné pro vytváření tuhých multifunkčních spojů (odolnost ve smyku, axiální i momentové namáhání) při použití různých materiálů – masivní a lamelové dřevo, beton či kov.

Vlastnosti sanačního systému (lepidla/tmelu)

Systém Xepox je dodáván v různých provedeních [16]:

- **Xepox P** (primer) – vhodné pro výztuže konstrukcí s uhlíkovými či skleněnými vlákny, dále pro konstrukci vložek FRP, aplikace válečkem či stříkáním;
- **Xepox L** (tekutý) – velmi tekuté, používané pro lepení svislých hlubokých otvorů a velkých kloubů se skrytými vložkami nebo velmi malými mezerami – vždy dobře utěsnit, aplikace vstříkáváním;
- **Xepox F** (fluidní) – tekuté, používané pro vstříkování a utěšňování mezer po frézování, pro upevnění zahnutých spojovacích prvků ke dřevu (systém Turrini-Piazza) ve stropech typu dřevo-beton, aplikace vstříkáváním;
- **Xepox G** (gel) – gelové lepidlo vhodné pro realizaci silných či nepravidelných vrstev, pro lepení výztužných prvků pomocí tkaniny ze skleněných či uhlíkových vláken, ale také pro kovové plátování, aplikace roztíráním;

Tabulka 1 – Vybrané vlastnosti produktů systému Xepox [16]

	Jednotka	Xepox P	Xepox L	Xepox F	Xepox G
Hustota	kg/m ³	1100	1400	1450	1900
Viskozita	mPa·s	A 1100 B 250	A 2300 B 800	A 14000 B 11500	A 450000 B 13000
Pevnost v tahu	N/mm ²	40	36	30	30
Doba zpracovatelnosti	min	25-30	25-30	25-30	-



Obrázek 35 – Příklad sanace dřeva s výztuží typem Xepox L [16]

8.1.2. Sanace trhlin pomocí epoxidové pryskyřice

Specifikace systému WEVO

Systém Wevo je modifikovaný dvousložkový systém epoxidové pryskyřice Wevo EP 32 S s tvrdidlem Wevo B 22 TS. Vytvrzená směs vyplňuje spáry a je odolná vůči klasickým klimatickým vlivům. Je vhodný pro opravu nosných dřevěných konstrukcí a trhlin v dřevěných komponentech [17].

Vlastnosti sanačního systému (lepidla/tmelu)

Trhliny určené k opravě se vyfouknout stlačeným vzduchem bez oleje a prachu. Před aplikací lepidla by měly být opravované trhliny přelepeny transparentní lepicí páskou. Samotná aplikace se provádí pomocí injektáže tlakovou pistolí, je důležité vyplnit celý objem trhliny a zabránit vytékání lepidla během vytvrzování a také dostatečný počet vstřikovacích otvorů [17].

Tabulka 2 – Vybrané vlastnosti systému Wevo [17]

	Jednotka	Pryskyřice EP 32 S	Tužidlo B 22 TS
Hustota	kg/m ³	1150-1180	1000-1030
Viskozita	mPa·s	11000-75000	2200-5500
		5000-14000	
Pevnost v tahu	N/mm ²	25,1	
Doba zpracovatelnosti	min	20-50	



Obrázek 36 – Tlaková injektáž lepidla do otvorů [18]

8.1.3. Sanace trhlin za použití polyuretanového lepidla

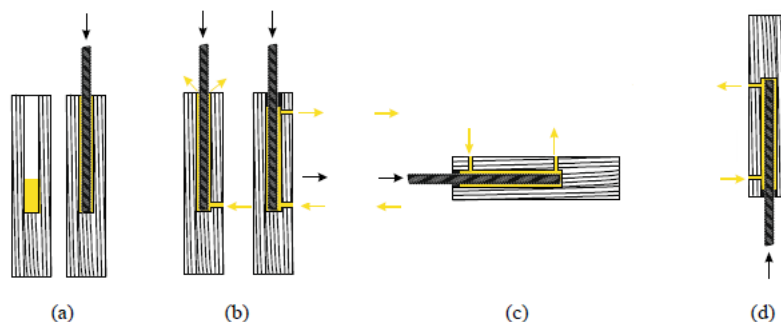
Specifikace systému Purbond

Pro sanaci trhlin pomocí polyuretanového lepidla je pro specifikaci vybrán systém Loctite® CR 421 Purbond. Jedná se o dvousložkový polyuretanový systém pro lepení závitových tyčí a výztuží v nosných dřevěných konstrukcích [19].

Lepené tyče (Glued-in rods – GiR) jsou účinným způsobem pro vytvoření tuhých a vysoce pevných spojů v dřevěných konstrukcích, kde je žádoucí odolnost vůči momentu a smykové pevnosti a pro zesílení konstrukčních prvků [20].

Variety aplikace sanace [20]:

- Nalítí lepidla do otvoru a následné vložení tyčí, v závislosti na viskozitě lepidla se tyče ponoří svou vlastní vahou nebo se zatlučou – horní část prvku;
- Vyvrtání druhého otvoru kolmo na spodní konec otvoru pro tyč a následné podtlakové vstřikování lepidla;
- c) d) Další varianty provedení aplikace lepidla



Obrázek 37 – Varianty provedení vlepovaných tyčí [20]

Vlastnosti sanačního systému (lepidla/tmelu)

Tabulka 3 – Vybrané vlastnosti produktu Loctite Purbond [19]

	Jednotka	A	B
Hustota	kg/m ³	1140	1220
		1350	
Viskozita	mPa·s	25000	250
		9000	
Pevnost v tahu	N/mm ²	25-30	
Doba zpracovatelnosti	min	10	

8.1.4. Sanace trhlin pomocí MS tmelu

Specifikace systému

Pro sanaci trhlin pomocí MS tmelu lze pro specifikaci vlastností vycházet např. z vlastností MS polymery – Mamut glue crystal, který je trvale pružný a odolný proti vodě i vlhkosti. Jedná se o univerzální lepidlo vhodné nejen pro lepení celé řady materiálů, ale i pro tmelení dilatačních spár v interiérech budov [21].

Vlastnosti sanačního systému (lepidla/tmelu)

Tabulka 4 – Vybrané vlastnosti produktu MS tmelu (Mamut Glue Crystal) [21]

	Jednotka	MAMUT GLUE CRYSTAL
Hustota	kg/m ³	1010
Viskozita	mPa·s	-
Pevnost v tahu	N/mm ²	2,2
Doba zpracovatelnosti	min	10

8.2. Zkoušení trvanlivosti lepených spojů

8.2.1. Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání

Trvanlivost lepených spojů postupem dle normy EN 302-1:2013 zahrnuje expozice (A2 až A8) jednotlivých prostředí, kterým je lepená spára zkušebních těles vystavena. Prostředí A2, A3 obnáší ponoření vzorků ve vodě **20 °C** po dobu **4 dnů**. Prostředí A4, A5 obnáší ponoření vzorků ve vodě **100 °C** po dobu **6 hodin** a následné ponoření ve vodě **20 °C** po dobu **2 hodin**). V prostředích A6, A7, A8 jsou vzorky zabaleny do hliníkové fólie při teplotě **50 °C**, **70 °C**, **90 °C** vždy po dobu **72 hodin**).

8.2.2. Stanovení odolnosti proti delaminaci

Delaminace lepené spáry se stanovuje dle normy EN 302-2:2018. Jedná se o postup, při kterém se provádí tlaková impregnace vzorků (600 kPa při teplotě vody **10-25 °C** po dobu **1 hodiny**) a následným sušením vzorků (při teplotě vzduchu **65 °C** a vlhkosti **12,5 %** po dobu 20 hodin pro lepidla typu I; při teplotě vzduchu **27,5 °C** a vlhkosti **30 %** po dobu 90 hodin pro lepidla typu II); celý cyklus se opakuje třikrát pro typ I a dvakrát pro typ II (cyklus se skládá ze dvou impregnací a jednoho sušení).

8.2.3. Zrychlené stárnutí (varem) pro lepidla na dřevo

Americký zkušební předpis ASTM D 3434 (*Standard Test Method for Multiple-Cycle Accelerated Aging Test (Automatic Boil Test) for Exterior Wet Use Wood Adhesives*), podle kterého jsou lepidla pro dřevěný materiál vystaveny vnějším podmínkám. Jako vhodná metoda pro stanovení trvanlivost se považuje vaření vzorků s následným sušením. Zkušební cyklus sestává z ponoření vzorků ve vodě při teplotě **23 °C** po dobu **3 dnů** a následné ponoření ve vodě **100 °C** po dobu **10 minut**, následného sušení a opětovného ponoření do vody **100 °C** na **10 minut**.

8.2.4. Standardní specifikace pro lepidla na lepené dřevěné prvky

Zkušební předpis ASTM D 2559 (*Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions*) zabývající se zkoušením lepidel pro dřevěné nosné prvky určené k vnějšmu použití. Vzorky jsou vystaveny tlaku 85 kPa a ponořeny do vody **18-27 °C** po dobu **5 minut**.

Dle normy ASTM D 2559 jsou vzorky vystaveny třem cyklům: vakuové/tlakové namáčení; vodní pára/tlakové namáčení a vakuové/tlakové namáčení, vždy následované sušením po dobu 3 dnů [22].

8.2.5. Stanovení odolnosti proti vodě

Pro stanovení odolnosti lepené spáry proti vodě se dle americké normy U.S. Product Standard PS 1-83 (*for Construction & Industrial Plywood*) využívají 3 typy zkušebních postupů. VAS – *Vacuum-Atmospheric Soak* test (ponoření do vody **49 °C** při 50 kPa po dobu **30 minut**, následné ponoření při atmosférickém tlaku po dobu **15 hodin**); VPS – *Vacuum-Pressure Soak* test (ponoření ve **studené vodě** při 84 kPa po dobu **30 minut**, následné ponoření při 414 kPa po dobu **30 minut**); BDB – *Boil-Dry-Boil* test (ponoření ve vodě **100 °C** po dobu **4 hodin**, sušení po dobu 20 hodin a následné ponoření ve vodě **100 °C** po dobu **4 hodin**).

8.3. Metodika zjišťování trvanlivosti lepených spojů

8.3.1. Výběr typu lepidla/tmelu

Na základě poznatků způsobů sanací výsušných trhlin pomocí různých konstrukčních lepidel a tmelů je sestavena přehledná tabulka, kde jsou vyznačeny konstrukční lepidla a tmely použité v experimentální části.

Tabulka 5 - Výběr lepidla/tmelu pro experimentální část

Konstrukční lepidlo	Epoxidová pryskyřice
	Polyuretanové lepidlo (PUR)
	Fenol-formaldehydové (PF)
	Fenol-resorcinol formaldehydové (PRF)
	Močovino-formaldehydové (UF)
	Melamim-močovino formaldehydové (MUF)
Tmel	PUR tmel
	MS polymer
	Akrylátový tmel
	Silikonový tmel

8.3.2. Optimalizace expozičního prostředí

Na základě požadavků různých analýz uvedených v kapitole zkoušení trvanlivosti lepených spojů je sestrojena metodika výběru hydrotermálního a mechanického namáhání, ze kterého následně vzejde metoda provedení zkoušek v experimentální části.

Tabulka 6 - Výběr expozičního prostředí pro experimentální část

Norma	Uložení ve vodě		Mechanické namáhání
	Teplota [°C]	Čas	
EN 302-1	20	2 hodiny + 4 dny	Smyk v tlaku Smyk v tahu
	100	6 hodin	
	50	72 hodin	
	70	72 hodin	
	90	72 hodin	
EN 302-2	10-25	1 hodina	
ASTM D3434	100	10 minut	
	23	3 dny	
	100	10 minut	
ASTM D2559	18-27	5 minut	
U.S. PS 1-83	50	30 minut + 15 hodin	
	20	30 minut	
	100	4 hodiny	

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9. METODIKA ZKOUŠEK

9.1. Lepidla a tmely

Pro experimentální část bylo využito smrkového dřeva, které bylo lepeno pomocí polyuretanového a epoxidového lepidla s tužidlem, tmelem na bázi MS polymeru a polyuretanovým tmelem.

9.1.1. Tmel na bázi MS polymeru

Jedná se o jednosložkový konstrukčně montážní MS polymer modifikovaný silanem s velmi vysokou počáteční přídržností, bez rozpouštědel, které lepí většinu běžných stavebních materiálů. Je vhodný pro lepení v exteriéru a interiéru (cihly, zrcadla, kamenné dlaždice, dřevěné desky, těžké dekorace na stěny). Tmel se velmi lehce vytlačuje, má dobrou přilnavost k mnoha podkladům, jeho největší výhodou je velmi vysoká okamžitá fixace. Barva bílá, betonová šedá, černá.

Tabulka 7 – Vlastnosti výrobku dle technického listu výrobce

Parametr	Norma	Jednotka	Hodnota
Tahová pevnost	ISO 37	N/mm ²	2,2
Protážení při porušení	ISO 37	%	350
Hustota	ISO 1183-1	kg/m ³	1410
Viskozita	-	mm ² /s	> 20,5
Rychlost vytvrzení	CQP 049-2	mm/hod	3/24

9.1.2. Polyuretanový tmel

Jedná se o jednosložkový, trvale pružný, těsnící tmel (polyuretan bez obsahu silikonů) a víceúčelové lepidlo bez obsahu rozpouštědel, s nestékavou konzistencí. Vhodný jako těsnící tmel pro svislé i vodorovné spáry, jako materiál tlumící hluk ve spoji, pro těsnění trhlin, těsnění v kovových a dřevěných konstrukcích, pro vzduchotechnické konstrukce. Vhodné na lepení do interiéru i exteriéru (okenní parapety, prahy, schodnice, soklové lišty, základové desky i prefabrikované prvky). Při lepení není nutné brousit lepené plochy, vykazuje dobrou mechanickou odolnost, velmi dobrou přilnavost na většinu stavebních podkladů, je dobře odolný vůči povětrnostním vlivům. Dobře tlumí hluk i vibrace. Barva béžová, cihlově červená, hnědá, černá, šedá, bílá.

Tabulka 8 – Vlastnosti výrobku dle technického listu výrobce

Parametr	Norma	Jednotka	Hodnota
Tahová pevnost	ISO 37	N/mm ²	1,5
Protažení při porušení	ISO 37	%	700
Hustota	ISO 1183-1	kg/m ³	1300
Viskozita	-	mm ² /s	> 20,5 hod
Rychlost vytvrzení	CQP 049-2	mm/hod	3,5/24

9.1.3. Polyuretanové lepidlo

Jednosložkové, vláknem armované polyuretanové lepidlo pro lepení dřevěných materiálů. Pro přípravu spojů s vynikající odolností proti vlhkosti. Barva béžová.

Tabulka 9 – Vlastnosti výrobku dle technického listu výrobce

Parametr	Jednotka	Hodnota
Hustota	kg/m ³	1200-1500
Viskozita	mPa.s	5000-7000
Rychlost vytvrzení	min	90

9.1.4. Epoxidové lepidlo

Jedná se o systémy laminačních pryskyřic neobsahující rozpouštědla či plniva určená pro zpracování a vytvrzování při pokojové teplotě. Viskozity směsí s laminační pryskyřicí jsou velmi nízké, což je výhodné pro zpracování při nízkých teplotách nebo zvláštních metodách zpracování, např. vstřikování. Díky výborné přilnavosti lze pryskyřici použít i jako adhezivo pro dřevo. Pro dosažení speciálních vlastností je možné přimíchat plniva (kovový prášek, prach, bavlněné vločky či piliny).

Tabulka 10 - Vlastnosti výrobku dle technického listu výrobce

Parametr	Jednotka	Epoxidová pryskyřice	Tužidlo
Protažení při porušení	%	4-7	
Hustota	kg/m ³	1130-1170	940-970
Kinematická viskozita	mPa.s	700-900	50-100
Rychlost vytvrzení	min	50-120	

9.2. Zkušební lepené spoje

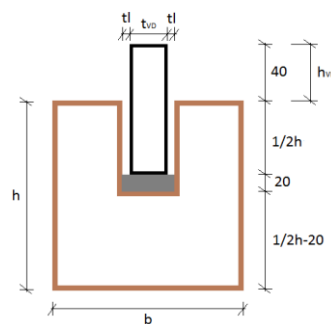
Pro experiment bylo vybráno dřevo smrkové, které je měkké a lehké, ale i poměrně pružné a pevné. Je také dobře opracovatelné, protože má obě vrstvy letokruhů přibližně stejně měkké. Smrkové dřevo patří k nejdostupnějším a nejpoužívanějším dřevinám, jeho uplatnění se nachází nejen ve stavebnictví, ale i v dalších odvětvích – výroba hudebních nástrojů či jako papírenská surovina [3].

9.2.1. Lepení vzorků

Před začátkem samotného lepení bylo nejprve nutné smrkové dřevo zkrátit na požadované rozměry. Požadované rozměry pro vlepované smrkové pero byly 120x120x30 mm, pro základní materiál s délkou zhruba 1000 mm se čtvercovým průřezem o rozměrech 160x160 mm. Takto rozměrově upravený materiál byl dále přichystán k vlepování per následujícím způsobem. Od hrany směrem po délce prvku bylo odměřeno 20 mm. Od tohoto bodu se na spodní plochu spáry vkládal měkký pružný podkladní materiál (polystyren) na celou délku pera, tj. 120 mm. Mezi každým perem byla ponechána mezera 40 mm. Vzniklá dutina nad polystyrenem byla oboustranně uzavřena po celé výšce drážky pomocí papírové lepenky, takto bylo alespoň z části zamezeno vytečení lepidla z lepené spáry. Nanášení lepidla/tmelu bylo prováděno pomocí rovnoměrně pomocí zubové stěrky. V případě epoxidového lepidla bylo nutné provést utěsnění spár v místě styku vloženého pera a polystyrenu pomocí modelovací plastelíny. Epoxidové lepidlo jako jediné bylo vléváno do spár. Tloušťka spáry pro lepidlo byla široká (2 ± 1) mm. Pro usnadnění manipulace s jednotlivými vzorky bylo po vytvrzení v místě mezery mezi jednotlivými vlepenými pery provedeno prořezání pomocí motorové pily. Celkově bylo takto vlepeno 36 smrkových per, což odpovídá 3 zkušebním sadám (referenční, voda, vaření) – 4 druhy lepidel po 3 vzorcích.



Obrázek 38 – Základní materiál s vlepenými pery



Obrázek 39 – Vložené pero

9.2.2. Zrychlená zkouška trvanlivosti

Pro experiment s vlepuvanými pery byly zvoleny expozice A1, A3 a A5, dle ČSN EN 302:2018, které byly modifikovány. Expozice 1 posloužila pro referenční vzorky. Expozice 2 sestávala po dobu 4 dnů ve vodě při teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$, následně byly vzorky vysušeny v sušárně při teplotě $(65 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do suchého stavu. Po vysušení byly vzorky ponechány ve standardním prostředí, kdy po dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva byla provedena zkouška pevnosti vlepuvaného pera ve smyku. Expozice 3 sestávala uložením vzorků po dobu 6 hodin ve vařící vodě a následnému ponoření na 2 hodiny ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Povytažení z vodní lázně byly vzorky vysušeny v sušárně při teplotě $(65 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do suchého stavu. Vysušené vzorky byly ponechány ve standardním prostředí do dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva. Po ustálení byla provedena zkouška pevnosti vlepuvaného pera ve smyku.

Tabulka 11 – Modifikace expozic vlepuvaných smrkových per dle ČSN EN 302:2018

Expozice	Ošetření
1	<ul style="list-style-type: none">○ standardní prostředí – teplota $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $(65 \pm 5) \%$;
2	<ul style="list-style-type: none">○ 4 dny ponoření ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;○ vysušení do absolutně suchého stavu;○ opětovné kondicionování ve standardním prostředí do dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva;○ zkoušení v suchém stavu;
3	<ul style="list-style-type: none">○ 6 hodin ponoření ve vařící vodě;○ 2 hodiny ponoření ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;○ vysušení do absolutně suchého stavu;○ opětovné kondicionování ve standardním prostředí do dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva;○ zkoušení v suchém stavu.

9.2.3. Stanovení pevnosti ve smyku

Po ukončení jednotlivých expozici bylo přistoupeno ke stanovení pevnosti vlepovaného pera, a to postupem odpovídajícím ČSN EN 302 – 1:2013.

Princip zkoušky

Smyková pevnost lepených spojů se stanoví působením podélné tahové síly na jednoduchý přeplátovaný spoj s tenkou a silnou vrstvou lepidla mezi pravoúhlými adherendy vyrobeného z bukové dřeva. Spoje jsou namáhány až do jejich porušení.

Postup zkoušky

Zkušební těleso se umístí symetricky do čelistí zkušebního zařízení tak, aby podélná osa vlepovaného pera byla paralelní se směrem zatěžování. Zatížení při porušení se zaznamená. Pro každý zkušební vzorek se vizuálně posoudí a odhadne na nejbližších 10% procentuální podíl porušení dřeva. Deformace byla odečítána pomocí extensometru umístěného na dřevěném vlepovaném peru.

Výsledek zkoušky

Pro výpočet smykové pevnosti zkušebních vzorků slouží vzorec:

$$f_v = \frac{F_{\max}}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

10. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

10.1. Stanovení pevnosti ve smyku

10.1.1. Referenční zkušební sada

Hodnoty pevností vlepovaného pera pomocí všech typů lepidel a tmelů jsou uvedeny v následující tabulce č. 12. Pro každé vlepované pero byla přesně změřena lepená plocha. Na následujících obrázcích jsou znázorněny průběhy pracovních diagramů ze zatěžování.

Tabulka 12 – Hodnoty referenční sady pro zkoušená lepidla a tmely v expozici 1

Typ lepidla/tmelu	Hodnoty lepených spojů				
	Č. vz.	F _{max} [kN]	l _{max} [mm]	Smyková pevnost (MPa)	Porušení spoje
PUR LEPIDLO	PUR1	14,2	3,60	1,18	90% adheze
	PUR2	29,4	4,60	2,45	50%-jednostranné
	PUR3	10,8	1,13	0,90	90% adheze
	průměr	18,1	3,11	1,53	80% adheze
EPOXIDOVÉ LEPIDLO	EP1	22,1	2,58	2,05	80% adheze
	EP2	10,9	4,15	0,93	90% adheze
	EP3	20,3	2,47	1,88	90% adheze
	průměr	17,77	3,07	1,62	90% adheze
MS POLYMER	MSP1	3,4	5,73	0,30	100% adheze
	MSP2	5,6	3,36	0,49	100% adheze
	MSP3	1,6	1,76	0,14	100% adheze
	průměr	3,53	3,62	0,31	100% adheze
PUR TMEL	PURT1	2,3	7,12	0,20	100% adheze
	PURT2	1,7	3,29	0,15	100% adheze
	PURT3	1,7	4,81	0,16	100% adheze
	průměr	1,90	5,07	0,17	100% adheze

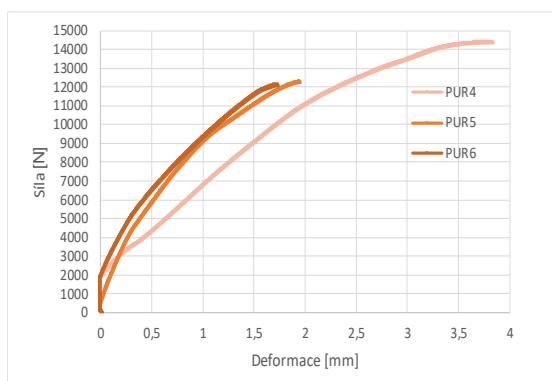
10.1.2. Expozice těles ve vodním uložení

Expozice obnášela uložení ve vodě o teplotě 20 °C po dobu 4 dnů s následným vysušením do suchého stavu a opětovné kondicionování do dosažení rovnovážné vlhkosti. Hodnoty pevností vlepuvaného pera pomocí lepidel a tmelů jsou uvedeny v následující tabulce č. 13. Pro každé vlepuvané pero byla přesně změřena lepená plocha.

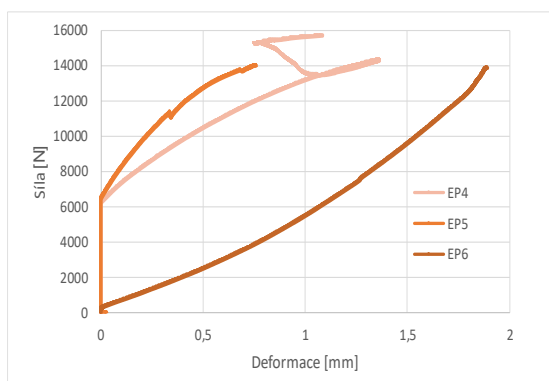
Tabulka 13 – Hodnoty zkušební sady pro zkoušená lepidla a tmely v expozici 2

Typ lepidla/tmelu	Hodnoty lepených spojů				
	Č. vz.	F _{max} [kN]	l _{max} [mm]	Smyková pevnost (MPa)	Porušení spoje
PUR LEPIDLO	PUR4	14,4	3,83	1,28	50%-jednostranné
	PUR5	12,2	1,95	1,11	50%-jednostranné
	PUR6	12,1	1,73	1,07	100% adheze
	průměr	12,9	2,5	1,15	70% adheze
EPOXIDOVÉ LEPIDLO	EP4	15,7	1,37	1,39	100% adheze
	EP5	14,0	0,76	1,24	90% adheze
	EP6	13,9	1,89	1,16	90% adheze
	průměr	14,5	1,34	1,26	90% adheze
MS POLYMER	MSP4	0,1	0,30	0,01	100% adheze
	MSP5	0,9	0,85	0,08	100% adheze
	MSP6	0,6	2,85	0,05	100% adheze
	průměr	0,5	1,33	0,05	100% adheze
PUR TMEL	PURT4	3,8	5,50	0,37	50%-jednostranné
	PURT5	2,9	3,53	0,26	100% adheze
	PURT6	3,0	4,48	0,27	100% adheze
	průměr	3,2	4,50	0,30	80% adheze

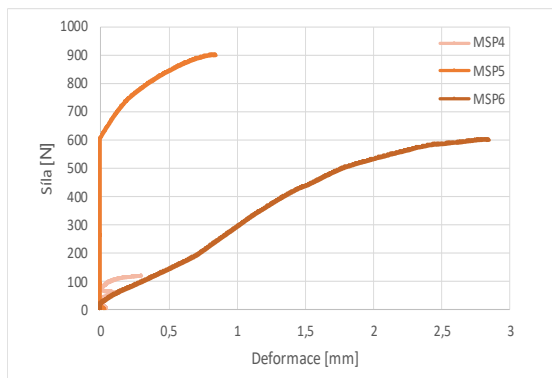
Na následujících obrázcích jsou znázorněny pracovní diagramy zkušebních těles uložených v expozici 2.



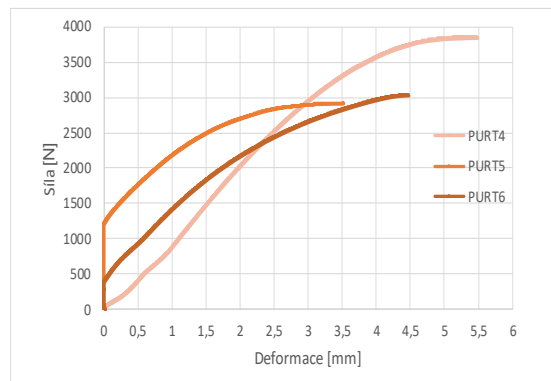
Graf 1 – Pracovní diagram zkušebních těles pro polyuretanové lepidlo v expozici 2



Graf 2 – Pracovní diagram zkušebních těles pro epoxidové lepidlo v expozici 2



Graf 3 – Pracovní diagram zkušebních těles pro tmel na bázi MS polymeru v expozici 2



Graf 4 – Pracovní diagram zkušebních těles pro polyuretanový tmel v expozici 2

10.1.3. Expozice těles ve vařící vodě

Expozice obnášela uložení ve vodě o teplotě 100 °C po dobu 6 hodin a následné uložení ve vodě při teplotě 20 °C po dobu 2 hodin s následným vysušením do suchého stavu a opětovné kondicionování do dosažení rovnovážné vlhkosti. Hodnoty pevností vlepuvaného pera pomocí lepidel a tmelů jsou uvedeny v následující tabulce č. 14. Pro každé vlepuvané pero byla přesně změřena lepená plocha.

Tabulka 14 – Hodnoty referenční sady pro zkoušená lepidla a tmely v expozici 3

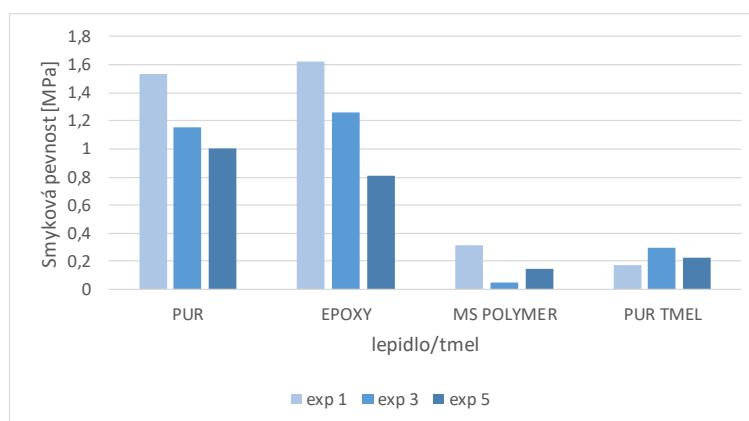
Typ lepidla/tmelu	Hodnoty lepených spojů				
	Č. vz.	F _{max} [kN]	l _{max} [mm]	Smyková pevnost (MPa)	Porušení spoje
PUR LEPIDLO	PUR7	10,8	2,00	0,94	50%-jednostranně
	PUR8	13,3	4,92	1,15	100% adheze
	PUR9	10,6	3,12	0,92	80% adheze
	průměr	11,6	3,35	1,00	80% adheze
EPOXIDOVÉ LEPIDLO	EP7	9,0	0,69	0,78	70% adheze
	EP8	11,8	2,10	1,05	100% adheze
	EP9	6,6	4,19	0,61	50%-jednostranně
	průměr	9,1	2,33	0,81	70% adheze
MS POLYMER	MSP7	1,1	0,84	0,10	100% adheze
	MSP8	2,2	1,53	0,20	100% adheze
	MSP9	1,7	1,73	0,15	100% adheze
	průměr	1,7	1,37	0,15	100% adheze
PUR TMEL	PURT7	4,1	3,55	0,36	100% adheze
	PURT8	1,3	4,68	0,12	100% adheze
	PURT9	2,3	6,89	0,21	100% adheze
	průměr	2,6	5,04	0,23	100% adheze

10.1.4. Vyhodnocení trvanlivosti lepidel

Pevnostní parametry – smyková pevnost

Z uvedených hodnot a z vyhodnoceného grafu č. 5 je patrné, že spoje lepené pomocí konstrukčních tmelů bez ohledu na vystavení různé expozici zdaleka nedosahují hodnot smykové pevnosti lepidel na bázi polyuretanu či epoxidové pryskyřice. Obecně je dosaženo největších smykových pevností u polyuretanového lepidla bez ohledu na expozici. Konkrétně největší hodnoty smykové pevnosti dosahují vzorky lepené epoxidovou pryskyřicí uložené v expozici 2 (uložení vzorků ve vodě při teplotě 20 °C). Dle očekávání vykazují lepidla větší pevnost než tmely po uložení v expozici 3, kdy dochází ve vařící vodě k vytvrzení lepidla a následnému zvýšení pevnosti.

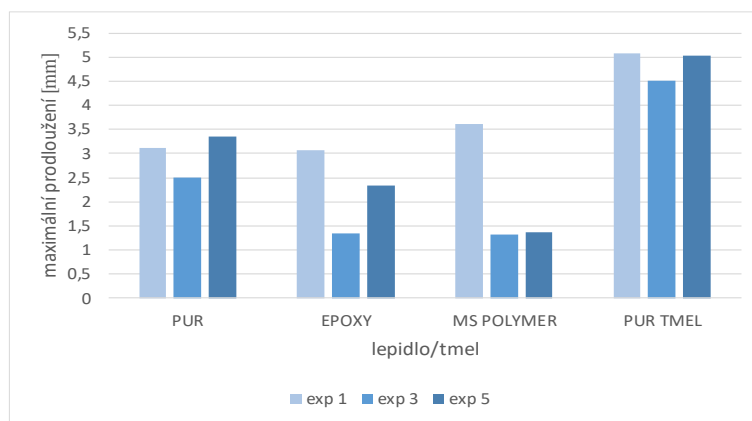
Z tmelů je na tom pevnostně lépe polyuretanový tmel, který sice po uložení ve standardním prostředí vykazuje nejmenší smykovou pevnost ze všech testovaných vzorků, ale v expozicích 2 a 3 si však vede lépe, než tmel na bázi MS polymeru, který po vodním uložení dosahuje nejmenší hodnoty smykové pevnosti.



Graf 5 – Smykové pevnosti lepidel a tmelů vystavených různým expozicím

Prodloužení vlepovaného pera při zátěžové zkoušce

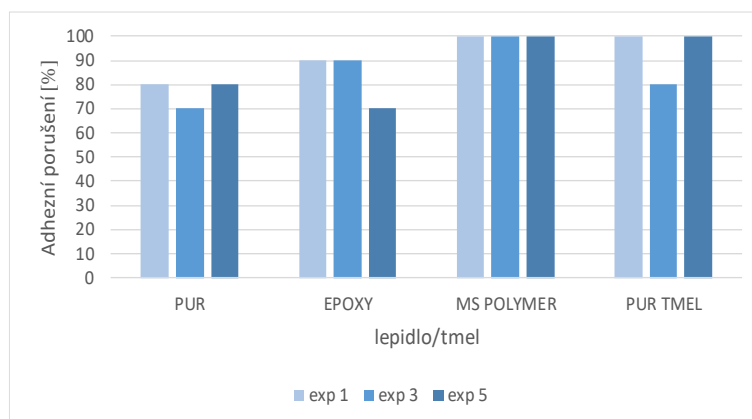
V grafu č. 6 je uvedeno maximální prodloužení porušení lepeného spoje při smykové zkoušce. Největší hodnoty prodloužení ve všech expozicích jsou zaznamenány u vzorků lepených polyuretanovým tmelem. Z hlediska expozic vykazují vzorky největší hodnoty prodloužení v expozici 1. Nejmenší hodnoty prodloužení vykazují vzorky uložené v expozici 2.



Graf 6 – Maximální prodloužení lepených spojů

Způsob poškození lepené spáry

V grafu č. 7 je vyjádřeno průměrné adhezní porušení lepidel a tmelů. V lepených spojích, kde je použit tmel na bázi MS polymeru dochází ke 100% adheznímu porušení ve všech testovaných expozicích. Nejnižší hodnoty adhezního porušení prokazují vzorky při použití polyuretanového lepidla, kdy ve všech prostředích dochází i k porušení dřeva.



Graf 7 – Adhezní porušení lepidel a tmelů vystavených různým expozicím

Na následujících obrázcích jsou ilustrativně znázorněny způsoby poškození vlepovaného pera do dřevěného prvku po vystavení expozici exp2.



Obrázek 40 – Porušení polyuretanového tmele po expozici 2 (100% ztráta adheze)



Obrázek 41 – Porušení tmele na bázi MS polymeru po expozici 2 (100% ztráta adheze)



Obrázek 42 – Porušení polyuretanového lepidla po expozici 2 (50% ztráta adheze)



Obrázek 43 – Porušení epoxidového lepidla po expozici 2 (90% ztráta adheze)

11. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval problematikou sanací dřevěných prvků. Cílem teoretické části bylo popsat nejen tesařské spoje a spoje s využitím spojovacích prostředků, ale i druhy lepidel využívaných pro konstrukční účely. Nedílnou součástí řešeršní části byl popis problematiky sanací dřeva zaměřený zejména na sanaci sesychacích trhlin. Metodickým postupem byly vybrány vhodné postupy pro stanovení trvanlivosti lepených spojů.

Pro experimentální část práce bylo vybráno smrkové dřevo, do kterého byly vleповány vybranými druhy lepidel/tmelů smrková pera. Byla vybrána lepidla pro konstrukční účely (epoxidové, jednosložkové polyuretanové) a dále tmely (MS tmel, tmel na bázi polyuretanu). Takto vyhotovené sestavy byly následně vystaveny různým hygrotermálním prostředím, kdy po ukončení zkoušky byly posouzeny jejich smykové pevnosti a míra adhezního porušení lepeného spoje.

Z výsledků zkoušek je patrné, že z hlediska smykové pevnosti jednoznačně vykazaly vyšší odolnost pro vleповané dřevěné prvky lepidla určená pro konstrukční účely. Oba dva typy tmelů po ukončení obou expozic nevykazovaly dostačující hodnoty pevností lepeného spoje, nicméně jako pozitivní výsledek spatřuji skutečnost, že u tmele na polyuretanové bázi nebylo dosaženo snížení tažnosti spoje, která byla ve všech případech i významně vyšší než u zbývajících testovaných lepidel. Ze získaných výsledků byl ověřen předpoklad, že tmely nedosahují takových parametrů tuhosti ani trvanlivosti lepených sestav, jako při použití konstrukčních lepidel. Obě dvě lepidla určená pro konstrukční účely vykazala obdobných parametrů při vyhodnocování ve všech expozicích, vyšší hodnot koheze porušeného spoje svědčící o vyšší odolnosti bylo dosaženo při použití polyuretanového lepidla.

NORMY:

ČSN 73 3150 - Tesařské spoje dřevěných konstrukcí. Terminologie třídění

ASTM D 3434 – Standard Test Method for Multiple – Cycle Accelerated Aging Test (Automatic Boil Test) for Exterior Wet Use Wood Adhesives

ASTM D 2559 – Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions

U.S. Product Standard PS 1-83 (for Construction & Industrial Plywood)

ČSN EN 302-1 (66 8531): Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání.

ČSN EN 302-2 (66 8531): Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 2: Stanovení odolnosti proti delaminaci

CITACE:

[1] GANDELOVÁ, Libuše, Jarmila ŠLEZINGEROVÁ a Petr HORÁČEK. *Nauka o dřevě*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. ISBN 80-7157-577-1.

[2] POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. BRATISLAVA: PRÍRODA, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

[3] KYDLÍČEK, Karel. *Příručka pro tesaře*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1971. 388 s.

[4] ČUNDERLÍK, Igor. *Štruktúra dreva*. Zvolen, 2009. Technická univerzita vo Zvolene.

[5] HÁJEK, Václav. *Pracujeme se dřevem* [online]. Praha: Svoboda-Libertas, 1993, 369 s. [cit. 2020-04-03]. ISBN 80-205-0323-4. Dostupné z: <http://kramerius-vs.nkp.cz/view/uuid:f52f4bb0-2ba0-11e9-b81e-005056827e52?page=uuid:541de400-5ba4-11e9-a9b4-5ef3fc9bb22f>

[6] PECINA, Pavel a Josef PECINA. *Materiály a technologie - dřevo*. 1. Brno: Masarykova univerzita, 2006. ISBN 80-210-4013-0.

[7] KUKLÍK, Petr, 2005. *Dřevěné konstrukce* [online]. 1. Praha: Informační centrum ČKAIT [cit. 2019-12-11]. ISBN 80-86769-72-0.

[8] HÁJEK, Václav. *Stavíme ze dřeva* [online]. Sobotáles nakladatelství, 1997 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.admiral-1.eu/navody/Stavime%20Ze%20Dreva%20-%20Vaclav%20Hajek.pdf>

- [9] GERNER, Manfred, Petr REZEK, Petr RŮŽIČKA a Frank DIEGELMANN. *Tesařské spoje*. Praha: Grada, 2003. Stavitel. ISBN 80-247-0076-X.
- [10] HÁJEK, Václav. *Kvalifikační příručka pro tesaře* [online]. 1. Praha: Práce, vydavatelství a nakladatelství ROH, 1973, 256 s. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://kramerus-vs.nkp.cz/view/uuid:d04bd640-2cd4-11e8-8cf8-005056827e52?page=uuid:a8903f90-4de7-11e8-afec-005056827e51>
- [11] JELÍNEK, Lubomír. *Tesařské konstrukce*. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 2003. ISBN 80-86364-98-4.
- [12] STRAKA, B a SÝKORA, K. *Dřevěné konstrukce, Studijní opory BO07*. VUT-Fast Brno, 2005.
- [13] *Příručka 1: Dřevěné konstrukce* [online]. 1. 2008 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_1_CZ_final.pdf
- [14] KOHOUT, Jaroslav, Antonín TOBEK a Pavel MÜLLER. *Tesařství: tradice z pohledu dneška*. 8., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 1996. Stavitel. ISBN 80-7169-413-4.
- [15] WITZANY, Jiří. *PDR-poruchy, degradace a rekonstrukce*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04488-9.
- [16] ROTHOBLAAS. *Technický list: Xepox-dvousložkové epoxidové lepidlo* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/xepox-epoxy-adhesive/xepox-l-liquid>
- [17] WEVO, Chemie GmbH. *Technisches Datenblatt: WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zur Instandsetzung tragender, gerissener Holz- und Brettschichtholzbauteile mittels Klebung* [online]. , 8 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: http://holz-leim.de/wp-content/uploads/2018/08/TM-EP-32-S-mit-H%C3%A4-B-22-TS_Sanierung.pdf
- [18] WARENHANDEL, Lübbert. *Handbuch: WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.brettschichtholz.de/publish/binarydata/aktuelles/studentenwettbewerb_stahlstangen/wevo-spezialharz-ep-32-s-mit-wevo-haerter-b-22-ts_18_01_11-klein.pdf
- [19] LOCTITE. *Technický list: LOCTITE®CR 421 PURBOND* [online]. 2015 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://docplayer.org/123792277-Loctite-cr-421-purbond.html>

- [20] STEIGER, Rene, Erik SERRANO, Mislav STEPINAC, Vlatka RAJCIC, Caoimhe O'NEILL, Daniel MCPOLIN a Robert WIDMANN, 2015. Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials* [online]. (97), 90-105 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/portalfiles/portal/17430667/Strengthening_of_timber_structures_with_glued_in_rods.pdf
- [21] DEN BRAVEN, Czech and Slovak a.s. *Technický list 04.38: Mamut Glue Crystal* [online]. 2014, 2 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.echemie.cz/data_files/zbozi_soubory/1289/soubor_3577.pdf
- [22] CHONG, K.P., J. LARSEN-BASSE a K. KOMVOPOULOS, MONTEIRO, P.J.M., ed. *Long Term Durability of Structural Materials* [online]. 1. Oxford, UK: Elsevier science, 2001, 312 s. [cit. 2020-06-01]. ISBN 0-08-043890-3. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=nxbF8ON2SvcC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false